



**Diogo Caldeira de  
Oliveira**

**Reconstrução 3D de chapas conformadas através  
de visão artificial**







**Diogo Caldeira de  
Oliveira**

**Reconstrução 3D de chapas conformadas através  
de visão artificial**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de António Gil D'orey de Andrade Campos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos**

Professor Associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Manuel José Cabral dos Santos Reis**

Professor Associado com Agregação da Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, professor Jorge Ferreira e professor Gil Campos, pela sua constante disponibilidade e por todo o apoio prestado no decorrer deste trabalho. À empresa Motofil pela facultação do robot FANUC, bem como aos engenheiros Vítor Medeiros e Bruno Marmé da empresa Infaimon, pela disponibilização do material utilizado no decorrer desta dissertação. Aos membros do laboratório de automação e robótica em geral, em especial ao Jorge Almeida, pelas valiosas dicas e sugestões. Aos membros integrantes do projeto SPIF-A, pela disponibilidade e contribuição demonstradas. Aos meus amigos e colegas de curso, que me acompanharam ao longo da minha vida e do meu percurso académico. Agradeço-te Sara, pelo teu apoio e paciência, e por estares presente sempre que preciso. Deixo ainda um especial agradecimento aos meus pais, por todo o esforço e dedicação demonstrados, absolutamente imprescindíveis para a minha formação. Para todos eles um grande Obrigado.



**Palavras-chave**

Visão estéreo; Modelos tridimensionais; Padrões regulares; Análise de deformações; Máquina de medição de coordenadas;

**Resumo**

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de análise de deformações ocorridas em superfícies metálicas por meio de técnicas de visão artificial, nomeadamente visão estéreo. As superfícies são inicialmente marcadas com padrões regulares, de características geométricas e distribuição conhecidas. Após a conformação das várias superfícies, é feita a aquisição de uma série de imagens estéreo, com as câmaras em várias posições, sendo que para cada configuração é realizado um procedimento de calibração. As imagens adquiridas são então alvo de várias técnicas de processamento no sentido de tratar e isolar a informação pertinente. É utilizado um processo que permite restaurar alguma da informação potencialmente perdida durante a fase de aquisição e processamento, permitindo assim o cálculo da correspondência estéreo, e da posterior triangulação. Obtido o modelo tridimensional de cada uma das superfícies, este é organizado sob a forma de uma malha de triângulos, cujos vértices representam os elementos do padrão após o processo de conformação. É então utilizada uma metodologia que permite a obtenção das várias componentes de deformação ocorridas e da sua distribuição, baseada na análise dos referidos elementos triangulares. Os resultados são apresentados sob a forma de mapas de cores tridimensionais, bem como graficamente. Os modelos tridimensionais das várias superfícies são comparados com resultados de medições efetuadas recorrendo a uma máquina de medição de coordenadas, de forma a obter uma medida aproximada da sua qualidade, e consequentemente apurar a fiabilidade dos valores de deformação obtidos.





**Keywords**

Stereo vision; Tridimensional models; Regular Patterns; Strain analysis; Coordinate measuring machine;

**Abstract**

This work consists in developing a system to analyse the strain occurred in metal surfaces by means of computer vision techniques, namely stereo vision. The surfaces are initially marked with regular patterns, of known geometrical features and distribution. After the metal forming process, a series of stereo images of the surfaces are acquired, with the cameras in several different positions, whereas for each arrangement, a calibration process is performed. The acquired images are then subjected to several processing techniques aiming to treat and isolate relevant information. A process is used to recover some of the potentially lost information during the acquisition and processing phases, thus easily allowing for the stereo correspondence solving, and subsequent triangulation. The tridimensional model obtained for each surface is then arranged in the form of a triangle mesh, whose vertexes represent the pattern elements after the metal forming process. A methodology is then used which allows for several strain components and respective distributions to be obtained, based on analysis of the above mentioned triangular elements. The results are shown in the form of tridimensional color maps, as well as graphically. The tridimensional models of the various surfaces are compared with results obtained from measures taken using a coordinate measuring machine, to obtain an approximate measure of their quality, and consequently ascertain the reliability of the strain values obtained.



# Conteúdo

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento e Apresentação do Problema . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Objetivos . . . . .  | 1         |
| 1.3      | Estrutura da Dissertação . . . . .   | 2         |
| <b>2</b> | <b>Revisão do Estado da Arte</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Técnicas de Reconstrução 3D . . . . .  | 3         |
| 2.1.1    | Triangulação por Laser . . . . .   | 5         |
| 2.1.2    | Luz Estruturada . . . . .  | 5         |
| 2.1.3    | <i>Time of Flight</i> . . . . .  | 6         |
| 2.1.4    | Visão Estéreo . . . . .  | 7         |
| 2.2      | Técnicas Experimentais de Medição de Deformações . . . . .                                     | 7         |
| 2.2.1    | Extensómetros . . . . .  | 7         |
| 2.2.2    | Técnicas Óticas . . . . .  | 8         |
| 2.3      | Exemplos de Sistemas Comerciais para Análise de Deformações Existentes<br>no Mercado . . . . . | 12        |
| <b>3</b> | <b>Metodologia de Reconstrução 3D</b>  | <b>15</b> |
| 3.1      | Seleção da Técnica a Utilizar . . . . .  | 16        |
| 3.2      | Preparação e Marcação dos Provetes . . . . .   | 16        |
| 3.3      | Descrição Sumária do Processo de Conformação . . . . .   | 18        |
| 3.4      | Descrição do Hardware e do Ambiente de Aquisição de Imagens . . . . .                          | 20        |
| 3.4.1    | Sensores Utilizados . . . . .  | 20        |
| 3.4.2    | Ambiente de Aquisição de Imagens . . . . .   | 21        |
| 3.5      | Reconstrução Estéreo . . . . .   | 23        |
| 3.5.1    | Calibração das Câmaras . . . . .   | 23        |
| 3.5.2    | Retificação . . . . .  | 28        |
| 3.5.3    | Pré-Processamento de Imagens . . . . .   | 30        |
| 3.5.4    | Binarização . . . . .  | 32        |
| 3.5.5    | Seleção e Cálculo das Coordenadas 2D . . . . .   | 34        |
| 3.5.6    | Cálculo da Correspondência . . . . .   | 42        |
| 3.5.7    | Triangulação Estéreo . . . . .   | 50        |
| 3.5.8    | Validação das Reconstruções Obtidas . . . . .  | 53        |
| <b>4</b> | <b>Cálculo das Deformações</b>   | <b>57</b> |
| 4.1      | Fundamentação Teórica . . . . .  | 57        |
| 4.2      | Procedimento . . . . .   | 61        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Resultados e Discussão</b>   | <b>67</b> |
| 5.1      | Reconstruções . . . . .   | 67        |
| 5.1.1    | Validação das Reconstruções e Estudo dos Erros . . . . .  | 68        |
| 5.2      | Deformações . . . . .   | 74        |
| 5.3      | Problemas e Limitações . . . . .  | 79        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>   | <b>81</b> |
| 6.1      | Conclusões . . . . .  | 81        |
| 6.2      | Trabalho Futuro . . . . .   | 82        |
| <b>A</b> | <b>Anexos</b>   | <b>87</b> |
| A.1      | Parâmetros extrínsecos obtidos com o processo de calibração das câmaras<br>nas diferentes configurações estéreo . . . . . | 87        |
| A.2      | Resultados referentes às reconstruções dos restantes provetes . . . . .   | 89        |
| A.3      | Resultados referentes aos restantes tipos de deformações ocorridas nos<br>modelos selecionados . . . . .                  | 90        |

# Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.1 | Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes esféricos marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de <i>baseline</i> curto, intermédio, e longo, correspondentes respectivamente à primeira, segunda e terceira linhas da tabela. . .  | 68 |
| 5.2 | Valores em milímetros do erro médio, desvio padrão (Std.) e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), associados a cada um dos modelos estéreo obtidos, e relativos à malha de elementos triangulares. . . . .   | 72 |
| 5.3 | Valores da percentagem de pontos cujo erro se encontra contido num intervalo $[-0.5, 0.5]$ mm, isto para todos os modelos constituídos por elementos triangulares. . . . .  | 74 |
| A.1 | Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes piramidais marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de <i>baseline</i> curto, intermédio, e longo, correspondentes respectivamente à primeira, segunda e terceira linhas da tabela. . . | 89 |
| A.2 | Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes cónicos marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de <i>baseline</i> curto e intermédio, correspondentes respectivamente à primeira e segunda linhas da tabela. . . . .                  | 90 |



# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Diagramas contendo várias técnicas de aquisição de forma divididas em categorias (a) bem como divisão das técnicas ópticas de aquisição de forma nas suas sub-categorias (b) (de acordo com [1]). . . . .  | 4  |
| 2.2  | Scanner Laser ROLAND PICZA LPX-1200 3D. . . . .  | 5  |
| 2.3  | Da esquerda para a direita: Um sistema de luz estruturada constituído por duas câmaras e um projetor, duas imagens de um objeto iluminado por dois padrões de diferente codificação e a nuvem de pontos 3D do objeto reconstruído. . . . .   | 6  |
| 2.4  | Sistema LIDAR Velodyne HDL-64E. . . . .  | 6  |
| 2.5  | Sistema de visão estéreo PointGrey <sup>®</sup> Bumblebee XB3. . . . .   | 7  |
| 2.6  | Esquema de construção típico de um extensómetro eléctrico resistivo. . . .   | 8  |
| 2.7  | Análise Fotoelástica de um Fémur. . . . .  | 9  |
| 2.8  | Formação de padrão Moiré básico (a) e padrão resultante da aplicação da interferometria de Moiré na proximidade de uma fenda num composto laminado (b). . . . .  | 10 |
| 2.9  | Superfícies marcadas com grelha de círculos (a) e grelha de quadriláteros (b) recorrendo a laser, e o seu aspecto após sofrerem deformação. . . . .  | 11 |
| 2.10 | Provete marcado com padrão estocástico tipicamente utilizado em técnicas de correlação digital de imagens. . . . .   | 11 |
| 2.11 | Na imagem (a) pode-se observar uma chapa após conformação, marcada com um padrão periódico de pontos, e rodeada por calibradores. A imagem (b) é uma representação dos resultados típicos obtidos com o software ARGUS, no que diz respeito à redução de espessura da superfície . . . . .         | 12 |
| 2.12 | Em (a) é visível um tipo de resultados passíveis de obter com o software ARAMIS <sup>®</sup> e em (b) o <i>hardware</i> integrante do dito sistema. . . . .  | 13 |
| 3.1  | Diagrama resumo das várias etapas constituintes da metodologia de reconstrução adotada. . . . .  | 15 |
| 3.2  | Na imagem (a) pode-se observar: (a) Representação esquemática do processo de gravação eletro-química, (b) exemplo de stencil com padrão de círculos. Na imagem (b) é possível observar algum do material de marcação eletro-química utilizado, nomeadamente o stencil, o tecido e o eléctrodo. . . | 17 |
| 3.3  | Marcação de padrão de pontos utilizando robô industrial FANUC. . . . .   | 18 |
| 3.4  | Na imagem (a) é visível a ferramenta e o seu princípio básico de atuação e na imagem (b) pode-se observar uma representação esquemática simplificada da SPIF-A. . . . .  | 19 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.5  | Superfícies de geometria complexa obtidas pelo processo de estampagem incremental . . . . .   | 19 |
| 3.6  | 6 provetes conformados, de acordo com 3 tipos de geometrias e marcados com 2 tipos de padrões. . . . .  | 20 |
| 3.7  | Sensor Genie M1600 da Teledyne Dalsa. . . . .   | 20 |
| 3.8  | Critérios de seleção relevantes na escolha do tipo de iluminação a aplicar a um sistema de visão industrial. . . . .  | 22 |
| 3.9  | Ambiente de aquisição de imagens, constituído pela estrutura de suporte dos sensores, iluminação e câmara de isolamento visto do exterior (a) e do interior (b) . . . . .   | 22 |
| 3.10 | Aquisição de par estéreo de um provete marcado com um padrão de quadrículas e conformado com geometria esférica. A imagem (a) corresponde à aquisição efectuada pelo sensor esquerdo e a imagem (b) corresponde à aquisição por parte do sensor direito. . . . .  | 23 |
| 3.11 | Modelo de câmara <i>pinhole</i> . . . . .   | 24 |
| 3.12 | Interface de calibração individual e imagens usadas na calibração da câmara esquerda, na configuração de <i>baseline</i> intermédio. . . . .  | 26 |
| 3.13 | Processo de calibração individual. A imagem (a) ilustra a seleção da região de interesse, bem como a localização aproximada dos cantos das quadrículas nela contidas. Na imagem (b) observa-se a sua localização efetiva. . . . .   | 26 |
| 3.14 | Erro de reprojeção em píxeis relativo à calibração individual da câmara direita para a configuração de <i>baseline</i> intermédio. . . . .  | 27 |
| 3.15 | Interface de calibração estéreo e representação tridimensional dos parâmetros extrínsecos. . . . .  | 27 |
| 3.16 | Geometria epipolar entre duas câmaras. . . . .  | 28 |
| 3.17 | Par estéreo retificado de um provete com forma esférica. . . . .  | 29 |
| 3.18 | Efeito da distribuição desigual de luz pela superfície de um provete de geometria cónica. . . . .   | 30 |
| 3.19 | Pre-processamento de imagens com vista a melhoria do contraste. Imagem original (a), imagem resultante da filtragem homomórfica (b), imagem resultante da equalização adaptativa do histograma (c) e imagem resultante do processo de filtragem do ruído(d). . . . .  | 32 |
| 3.20 | Duas técnicas de binarização aplicadas a uma imagem de um provete de forma esférica, marcado com um padrão quadriculado, e após o tratamento de pre-processamento. Na imagem (a) observa-se o resultado da aplicação do método de Otsu. Já na imagem (b) é possível observar o resultado da aplicação do método de binarização adaptativa de Bradley. . . . . | 33 |
| 3.21 | Seleção manual de uma região de interesse contendo todo o padrão a analisar (a) e imagem resultante após eliminado o ruído (b) . . . . .  | 34 |
| 3.22 | Em (a) é visível o resultado da operação de rotação em torno do centro da imagem e em (b) pode-se observar uma secção da Fig. 3.22 (a) após o processo de <i>Thinning</i> . . . . .   | 35 |
| 3.23 | Distribuição da localização dos pontos de ramificação ( a verde ) e pontos terminais ( a vermelho) por todo o padrão (a). Pormenor das ramificações indesejáveis existentes em alguns dos segmentos (b). . . . .  | 36 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.24 | Resultado da filtragem digital e da eliminação de objetos considerados muito grandes ou muito pequenos (a). Centroides dos objetos, aproximadamente coincidentes com as zonas de intersecção (b). . . . .   | 37 |
| 3.25 | Ampliação de uma imagem onde é visível a vermelho, a localização aproximada dos pontos de intersecção (a) e imagem ampliada onde são visíveis os múltiplos segmentos individuais, resultante do processo de interrupção da grelha nas zonas de intersecção (b). . . . .   | 38 |
| 3.26 | Determinação das coordenadas através do cálculo de intersecções polinomiais, utilizando 12 segmentos por polinómio. Representação de uma intersecção na zona interior do padrão (a), e representação de uma intersecção próxima das margens do padrão (b). . . . .  | 39 |
| 3.27 | Posição final das coordenadas das intersecções determinadas pelo método de intersecção polinomial numa das imagens retificadas de um par estéreo (a) e ampliação de uma zona da imagem, onde é visível a diferença entre as coordenadas calculadas pelo referido método (a vermelho) e as coordenadas aproximadas de intersecção, resultantes das coordenadas dos pontos de ramificação (a verde) (b). . . . .  | 40 |
| 3.28 | Padrão binarizado contendo ruído. A imagem (a) representa algum ruído proveniente da binarização de arestas vivas de um provete. A imagem (b) representa um objeto resultante de sujidade presente no provete. . . . .  | 41 |
| 3.29 | Imagem de um padrão de pontos binarizado, após remoção do ruído. . . .  | 42 |
| 3.30 | Na imagem (a) é visível a vermelho a localização do objecto da imagem esquerda catalogado com o número 500. Em (b) é possível ver a imagem contendo a faixa branca, posicionada de acordo com a ordenada do centroide relativo ao objeto identificado em (a). Em (c) observa-se a imagem usada como máscara no processo de reconstrução, contendo apenas os pontos da imagem direita por corresponder, e com a qual é intersectada a imagem (b). Finalmente em (d) observam-se os pontos reconstruídos, candidatos à correspondência, em que o ponto mais à esquerda, marcado a vermelho, representa a correta correspondência. . . . . | 45 |
| 3.31 | Objeto resultante da dilatação de cada um dos objetos do padrão (a) bem como as suas arestas após dilatação (b). . . . .  | 46 |
| 3.32 | Pontos fronteiros, com um ponto em falta na região demarcada a vermelho (a) e ampliação da região, com a posição prevista do ponto em falta a vermelho, e com as coordenadas dos centroides dos objetos usados na sua determinação marcadas a verde (b). . . . .  | 47 |
| 3.33 | Imagens obtidas por meio da dilatação de um padrão de pontos com elementos estruturantes lineares de orientação pré-determinada (a) e de orientação perpendicular a esta (b). . . . .   | 48 |
| 3.34 | Imagens onde é visível a esqueletização da zona superior esquerda dos padrões de faixas presentes em 3.33(a) e em 3.33(b), bem como a localização dos pontos terminais existentes nessa região. . . . .   | 48 |
| 3.35 | Duas imagens de faixas esqueletizadas, contendo em cada uma os dois grupos de pontos terminais a emparelhar. . . . .  | 49 |
| 3.36 | Imagens das faixas esqueletizadas referentes a uma das imagens base, contendo as porções em falta reconstruídas. . . . .  | 50 |
| 3.37 | Geometria de um sistema estéreo de configuração frontal paralela. . . . .   | 51 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.38 | Relação inversamente proporcional, e não linear, entre a profundidade e a disparidade num sistema estéreo. . . . .   | 52 |
| 3.39 | Nuvem de pontos de um provete conformado com forma esférica, marcado com um padrão de pontos, e relativa a uma configuração de <i>baseline</i> longo. . . . .  | 52 |
| 3.40 | Superfície resultante da aplicação da função de modelação <i>gridfit</i> , numa nuvem de pontos tridimensionais obtidos por visão estéreo (a), e a sua visualização recorrendo ao <i>SolidWorks</i> <sup>®</sup> , após a conversão em formato STL (b). . . . .  | 53 |
| 3.41 | Medição de uma secção de um provete utilizando uma máquina de medição de coordenadas (a) e obtenção da secção correspondente na superfície obtida por visão estéreo (b). . . . .   | 55 |
| 3.42 | Gráfico onde são visíveis os perfis referentes a três reconstruções estéreo do mesmo provete utilizando o <i>baseline</i> curto, intermédio e longo ( <i>short</i> , <i>int</i> e <i>wide</i> ), bem como a curva formada pelos pontos adquiridos com a máquina de medição de coordenadas (CMM). . . . .                                 | 55 |
| 4.1  | Representação de um triângulo antes (a) e depois (b) de sofrer uma deformação. . . . .   | 57 |
| 4.2  | Círculo de Mohr para um estado plano de tensão. . . . .  | 59 |
| 4.3  | Representação da nuvem de pontos no seu referencial original, correspondente à câmara esquerda (a), e representação da nuvem de pontos após uma transformação do referencial (b). . . . .  | 62 |
| 4.4  | A imagem (a) constitui uma exemplificação do esquema de numeração de pontos aplicado na grelha virtual. Em (b) observam-se a grelha virtual de pontos a azul, e a vermelho a grelha resultante da projeção dos pontos da Fig.4.3 (b) sobre o plano Z=0. . . . .  | 62 |
| 4.5  | Malha de elementos triangulares obtida a partir da nuvem de pontos de um provete de forma piramidal. . . . .   | 63 |
| 4.6  | A figura representa as três estratégias distintas utilizadas no cálculo das deformações nodais, e os números representam o peso que cada um dos elementos triangulares tem no cálculo da deformação nodal. . . . .   | 64 |
| 4.7  | Distribuição das deformações principais máximas na superfície de um provete de forma esférica, fruto do cálculo das deformações elementares. . . . .   | 64 |
| 4.8  | Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete de forma esférica, resultante do cálculo das deformações nodais recorrendo à estratégia da média ponderada (Fig.4.6 (a)). . . . .   | 65 |
| 4.9  | Relação entre as deformações principais mínima e máxima para cada um dos nós da nuvem de pontos (a). Distribuição do número de nós pelos vários valores de deformação principal máxima existentes (b). Ambos os gráficos dizem respeito ao cálculo das deformações recorrendo à estratégia da Fig. 4.6 (a) num provete esférico. . . . . | 65 |
| 5.1  | Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete esférico, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos <i>baselines</i> curto, intermédio e longo são representadas respetivamente pelas cores azul, verde e vermelho. . . . .               | 69 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.2  | Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete piramidal, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos <i>baselines</i> curto, intermédio e longo são representadas respetivamente pelas cores azul, verde e vermelho. . . . .   | 70 |
| 5.3  | Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete cónico, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos <i>baselines</i> curto e intermédio são representadas respetivamente pelas cores azul e verde . . .  | 71 |
| 5.4  | Imagem demonstrativa do efeito da variação do <i>baseline</i> . . . . .   | 73 |
| 5.5  | Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete esférico. . . . .  | 75 |
| 5.6  | Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete piramidal. . . . .   | 75 |
| 5.7  | Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete cónico. . . . .  | 76 |
| 5.8  | Diagramas de frequência referentes à distribuição do número de nós pelos vários valores de deformação nodal e para os três provetes selecionados. A vermelho verde e azul estão representadas as curvas associadas aos provetes esférico, piramidal e cónico respetivamente. . . . .  | 76 |
| 5.9  | Diagrama que representa a relação entre as deformações principais mínimas e máximas para cada nó, relativo ao provete esférico (a) e ao provete piramidal (b). . . . .  | 77 |
| 5.10 | Diagrama que representa a relação entre as deformações principais mínimas e máximas para cada nó, relativo ao provete cónico. . . . .   | 78 |
| 5.11 | Em (a) e (b) observa-se um par estéreo retificado obtido recorrendo a uma configuração de <i>baseline</i> longo, e relativo a um provete cónico. Em (c) está representada uma secção da imagem (a) onde é visível o aumento da densidade dos pontos numa região, e em (d) pode-se observar o problema causado por este efeito durante a fase de reconstrução dos pontos em falta. . . . . | 79 |
| A.1  | Representação dos parâmetros extrínsecos em milímetros, relativos à configuração de <i>baseline</i> curto. . . . .  | 87 |
| A.2  | Representação dos parâmetros extrínsecos em milímetros, relativos à configuração de <i>baseline</i> intermédio (a) e de <i>baseline</i> longo (b). . . . .  | 88 |
| A.3  | Distribuição das deformações principais mínimas ao longo da superfície de um provete esférico. . . . .  | 90 |
| A.4  | Distribuição das deformações principais mínimas ao longo da superfície de um provete piramidal (a) e de um provete cónico (b). . . . .  | 91 |
| A.5  | Distribuição das deformações de engenharia máximas ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cónico (c). . . . .   | 92 |
| A.6  | Distribuição das deformações de engenharia mínimas ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cónico (c). . . . .   | 93 |
| A.7  | Distribuição das deformações de espessura ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cónico (c). . . . .  | 94 |
| A.8  | Distribuição da deformação eficaz ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cónico (c). . . . .  | 95 |



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento e Apresentação do Problema

As peças obtidas por processos de conformação plástica, como por exemplo métodos tradicionais com matriz e punção ou processos de estampagem incremental, não reproduzem fielmente as dimensões pretendidas e previamente definidas nos modelos CAD. Entre as razões mais frequentes para esta discrepância dimensional está por exemplo o fenómeno de retorno elástico. A verificação dimensional obtida através de processos com intervenção humana é, normalmente, um processo lento, e requer, frequentemente, a utilização de tecnologia de custo elevado como, por exemplo, máquinas de medição de coordenadas por pontos. Além disso, para se obter uma verificação dimensional de uma peça completa, é normalmente necessário proceder a um elevado número de medições.

Na última década, o desenvolvimento de técnicas de medição ótica, aliado à inovação de software de tratamento de dados, permitiu a realização de medições não intrusivas e sem qualquer contacto. Para tal, recorre-se ao uso de sistemas de visão artificial que, através da aquisição e processamento de imagens, tornam possível a obtenção de um conjunto de informações, nomeadamente a localização relativa do ponto de aquisição de imagem, a localização tridimensional de um grupo de pontos, o cálculo de alterações dimensionais, entre outros. Para que os sistemas de visão possam retirar este tipo de informações de toda a peça, esta, antes de ser conformada, é sujeita a marcações padronizadas de geometria e dimensões conhecidas, o que posteriormente, após o processo de conformação, e através de uma análise óptica, possibilita o cálculo da variação das distâncias relativas entre cada elemento da malha. Este tipo de sistemas de medição óticos são atualmente utilizados na indústria de conformação plástica de chapa para detecção de zonas críticas de deformação, para a resolução de problemas complexos de conformação, otimização de processos de conformação, verificação de ferramentas de estampagem e para a validação e otimização de simulações numéricas.

### 1.2 Objetivos

Com esta dissertação pretende-se desenvolver um sistema baseado em técnicas de visão artificial que permita a reconstrução tridimensional de peças obtidas através de processos de conformação plástica. Os resultados devem ser apresentados numa malha fina criada a partir da determinação das coordenadas tridimensionais e refletindo a su-

perfície do objecto medido. Deve também permitir a análise da deformação das várias secções da peça. Deverá ainda ser possível comparar o modelo 3D obtido com o modelo CAD 3D que originou a peça. Para tal, a reconstrução obtida deverá ser passível de conversão para um formato de ficheiro compatível com software CAD/CAM. O sistema de medição deve operar independentemente do processo de conformação e deve proporcionar resultados de todo o campo com elevada resolução. Uma vez que não se pretende um sistema de medição em tempo real, o tempo de processamento não é um fator crucial, pelo que o trabalho é desenvolvido em ambiente Matlab.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema abordado bem como uma descrição dos seus principais objetivos.

No segundo capítulo é feita a revisão do estado-da-arte. São primeiramente abordados os principais métodos de obtenção de modelos tridimensionais, e posteriormente é feita uma descrição sucinta de alguns dos métodos de reconstrução óticos mais comuns. Ainda neste capítulo, são descritas algumas das técnicas de análise de deformações, e nesse sentido, são expostos alguns exemplos de aplicações comerciais disponíveis.

No terceiro capítulo é descrita toda a metodologia que combina a visão estéreo e a utilização de padrões geométricos por forma a chegar aos modelos tridimensionais desejados.

O capítulo quatro expõem as questões relacionada com o cálculo das deformações ao longo das superfícies dos vários modelos obtidos. Nele é feita uma descrição da fundamentação matemática utilizada na sua obtenção, bem como dos procedimentos utilizados para a pôr em prática.

No quinto capítulo é feita a exposição dos resultados em termos de modelos tridimensionais obtidos e suas respectivas deformações, bem como um estudo da qualidade dos vários modelos tendo em conta a variação de alguns elementos, e de acordo com uma metodologia de análise do erro exposta no final do capítulo três.

São apresentadas no capítulo seis as conclusões gerais deste trabalho, bem como algumas propostas de trabalho futuro consideradas pertinentes.

Por fim, são listadas todas as referências utilizadas no decorrer desta dissertação, e é ainda exposto um conjunto de conteúdos adicionais distribuídos ao longo de três apêndices.

## Capítulo 2

# Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo faz-se uma breve introdução ao tema da reconstrução tridimensional, passando pelas suas múltiplas aplicações e pelas várias técnicas existentes, sendo apresentados alguns dos sistemas considerados pertinentes. É ainda abordada a temática da análise e medição de deformações, bem como algumas das técnicas utilizadas nesse âmbito, sendo referidos alguns dos sistemas atualmente existentes no mercado para esse fim.

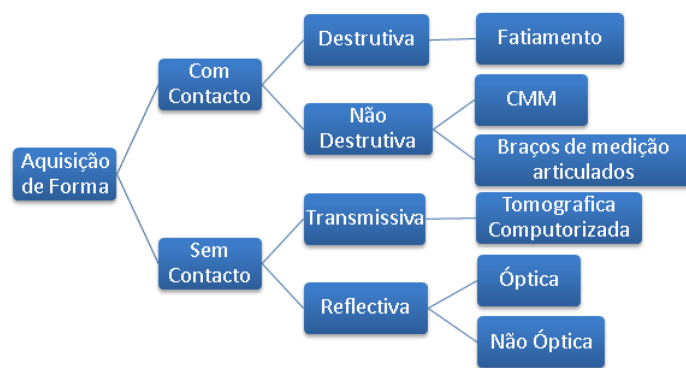
### 2.1 Técnicas de Reconstrução 3D

Existe atualmente um conjunto muito variado de técnicas de reconstrução tridimensional. O seu campo de aplicação é também ele muito vasto e não se limita apenas à indústria metalomecânica, podendo ir por exemplo desde a medicina, no auxílio a certos procedimentos cirúrgicos, à arqueologia, na reconstrução de património cultural, e passando ainda pela investigação criminal [2].

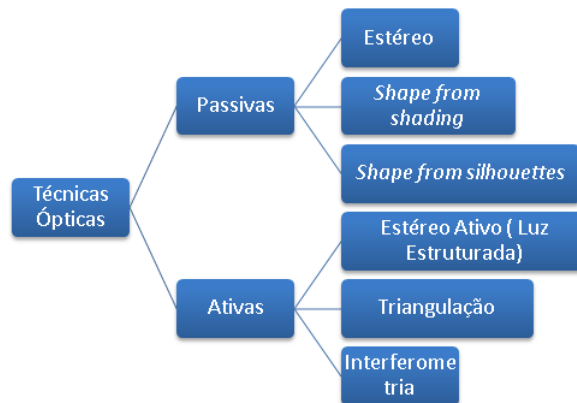
Estas técnicas podem ser distribuídas por várias categorias de diferentes formas, dependendo dos critérios tidos em conta na sua diferenciação. De acordo com a classificação usada em [1] podem diferenciar-se dois grandes grupos de sistemas de medição: são eles os sistemas envolvendo contacto, como é o caso da máquina de medição de coordenadas (CMM), e os sistemas que não envolvem qualquer contacto, ou remotos. Dentro deste último grupo, podem-se distinguir os sistemas baseados na aquisição de radiação transmitida, como é o caso da tomografia computadorizada, e aqueles que se baseiam na aquisição de radiação reflectida. O anterior pode-se ainda dividir em duas categorias, consoante o tipo de sensores utilizados. Estes sensores podem ser divididos em óticos e não-óticos. No grupo dos sensores não-óticos estão incluídos por exemplo os sensores acústicos, electromagnéticos e outros. As técnicas que utilizam este tipo de sensores baseiam-se normalmente na medição do tempo que um determinado sinal demora a chegar ao sensor depois de ser emitido e reflectido na superfície a reconstruir, e é através dessa medição que se consegue aferir a distância a que a superfície se encontra. Já nos sensores óticos, a profundidade é obtida através da informação transportada pela luz, habitualmente imagens ou vídeos [2]. Na Fig. 2.1 (a) é possível observar um diagrama que descreve a divisão das técnicas de aquisição de forma nas suas várias categorias, de acordo com a classificação acima descrita.

Alguns autores dividem ainda as técnicas de reconstrução óticas em dois grandes gru-

pos: ativas e passivas. Nas técnicas passivas, a reconstrução tridimensional é elaborada com base na informação contida em duas ou mais imagens, através do conhecimento de pontos em comum presentes nas mesmas, normalmente calculados recorrendo a determinados algoritmos de correspondência estéreo, e embora se possa fazer uso de meios de iluminação, estes servem apenas para enaltecer a qualidade da informação obtida [3]. Por sua vez, nas técnicas ativas, são utilizados processos específicos de projeção de luz sobre o objecto a reconstruir por forma a aferir as suas coordenadas tridimensionais, sendo essa mesma luz modulada de forma espacial e/ou temporal [4]. No diagrama da Fig. 2.1 (b) pode-se observar a divisão das técnicas óticas nas categorias acima referidas, bem como algumas das técnicas incluídas em cada uma delas.



(a)



(b)

Figura 2.1: Diagramas contendo várias técnicas de aquisição de forma divididas em categorias (a) bem como divisão das técnicas óticas de aquisição de forma nas suas sub-categorias (b) (de acordo com [1]).

Cada um dos diferentes métodos possui as suas especificidades, vantagens e desvantagens. Neste trabalho pretende-se desenvolver uma metodologia baseada em visão artificial capaz não só de permitir a obtenção de um modelo 3D de uma dada peça, mas também de informações relativas às deformações sofridas pela mesma durante o seu processo de conformação. Entendeu-se portanto que os sistemas óticos são aqueles que apresentam maior relevância para os propósitos pretendidos. Seguem-se assim algumas das técni-



cas de reconstrução óticas mais comuns, respectivamente acompanhadas de uma breve descrição.

### 2.1.1 Triangulação por Laser

Como o próprio nome sugere, este método baseia-se no princípio da triangulação. Este tipo de sistemas é habitualmente composto por um emissor laser e por um sensor óptico. São conhecidos tanto a distância entre ambos, conhecida por *baseline*, como o ângulo formado entre os seus respectivos eixos ópticos. O laser emite um feixe de luz que incide no objecto a medir num determinado ponto. O sensor óptico capta a imagem desse ponto, e são determinadas as coordenadas do mesmo no plano da imagem. Assim, é definida uma recta entre as coordenadas do ponto no plano da imagem, e o centro óptico do sensor e, por fim, a posição tridimensional do ponto é obtida por meio de cálculos trigonométricos relativamente simples. É ainda possível incorporar uma lente cilíndrica no emissor laser, o que causa uma expansão do feixe ao longo de uma direção, criando um plano de luz e iluminando assim múltiplos pontos do objecto em simultâneo [2]. O ROLAND PICZA LPX-1200 3D (Fig. 2.2) é um exemplo de um sistema que utiliza este tipo de princípio.



Figura 2.2: Scanner Laser ROLAND PICZA LPX-1200 3D [5].

Este tipo de sistemas costuma ser bastante preciso e apresenta uma grande insensibilidade às condições de iluminação e por essas razões é amplamente utilizado na indústria, seja para medir distâncias, diâmetros ou no controlo geral de qualidade, bem como em aplicações de engenharia inversa e modelação de património [2]. Além disso, estes sistemas permitem a obtenção de um modelo sem recorrer à informação presente na textura, pelo que pode ser usado na digitalização de objetos em que a mesma apresenta pouca ou nenhuma variação. Apresentam contudo um preço elevado e podem revelar-se inadequados na medição de superfícies com determinadas características refletivas [6].

### 2.1.2 Luz Estruturada

Esta técnica é também baseada no princípio da triangulação. Contudo, em vez de um laser é usado um projetor que faz incidir um determinado padrão predefinido na superfície do objecto a medir. Uma câmara é responsável por adquirir as imagens do

padrão projetado, e através da análise das deformações desse mesmo padrão, é inferida a geometria do objecto. Os padrões usados podem ser constituídos por linhas pretas (Fig. 2.3) ou de variadas cores, ou por padrões mais complexos, e são codificados espacial ou temporalmente [6]. Estes padrões são concebidos por forma a que sejam atribuídos determinados códigos a cada pixel, sendo que cada pixel possui um único código, tanto ao nível do projetor como ao nível do sensor, permitindo assim o cálculo da correspondência, e a posterior determinação da posição tridimensional de cada ponto através de triangulação, desde que o sistema câmara-projetor esteja corretamente calibrado [7].

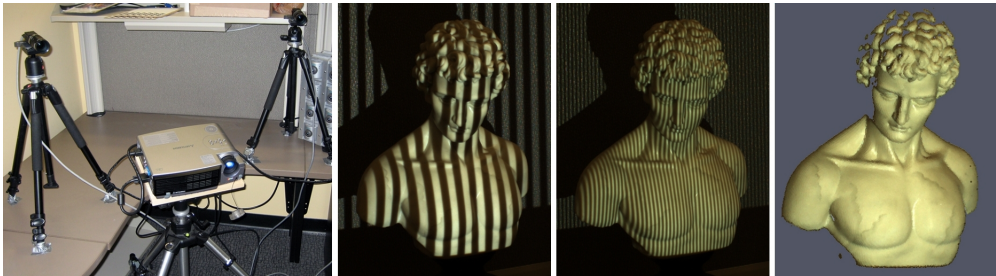


Figura 2.3: Da esquerda para a direita: Um sistema de luz estruturada constituído por duas câmaras e um projetor, duas imagens de um objeto iluminado por dois padrões de diferente codificação e a nuvem de pontos 3D do objeto reconstruído [8].

### 2.1.3 *Time of Flight*

Esta é uma técnica que permite o cálculo da profundidade com base na medição do tempo que a luz emitida por uma determinada unidade emissora, leva a atingir um objecto e a ser recebida de volta por um sensor, depois de refletida pelo objeto em causa. Um exemplo de um sistema que usa esta técnica são os scanners Light Detection and Ranging (LIDAR), como é o caso do Velodyne<sup>®</sup> HDL-64E (Fig. 2.4), capazes de realizar medições com alta precisão e velocidade [9]. Pode ser usada para medições de longo, médio e curto alcance, sendo que para longos alcances apresenta excelentes resultados. Já no que toca a medições realizadas a curtas distâncias obriga ao uso de circuitos especiais capazes de efetuar um elevado controlo temporal, uma vez que a curta distância pode originar intervalos de tempo emissão-recepção de magnitudes bastante reduzidas.

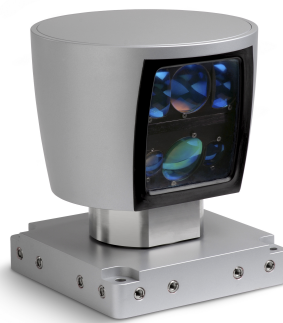


Figura 2.4: Sistema LIDAR Velodyne<sup>®</sup> HDL-64E [10].

Tal como na triangulação por laser, esta técnica pode apresentar alguns problemas na presença de superfícies refletoras e o seu uso pode ser condicionado pelos limites impostos em certos ambientes quanto ao uso de radiação laser [2].

#### 2.1.4 Visão Estéreo

Para obter uma reconstrução tridimensional através de visão estéreo são usadas duas ou mais imagens de uma mesma cena, adquiridas em posições diferentes. Para obter as coordenadas tridimensionais de determinado ponto, é necessário conhecer as coordenadas bidimensionais originadas por esse mesmo ponto nas várias imagens. Este é o chamado problema da correspondência. Para tentar solucionar este problema existem vários algoritmos, e novas soluções continuam a ser desenvolvidas nesse campo. Num problema de estéreo tradicional, as imagens sofrem um processo denominado retificação, que permite que o cálculo da correspondência entre imagens seja reduzido a um problema unidimensional de procura ao longo do eixo horizontal, reduzindo assim consideravelmente o custo computacional envolvido. Resolvida a correspondência entre dois pontos nas respectivas imagens, facilmente é obtida a diferença de abcissas entre ambos, denominada disparidade. Um processo de calibração permite a obtenção de um conjunto de informações específicas dos sensores, bem como a posição dos mesmos o que, em conjunto com a medida da disparidade e a coordenada do ponto nas várias imagens, permite o cálculo da sua posição tridimensional por meio de um processo de triangulação [11]. Um sistema deste tipo pode ser visto na Fig. 2.5 , constituído por três sensores, e permitindo assim adquirir imagens recorrendo ao par de sensores das extremidades ou a um sensor de uma extremidade conjuntamente com o sensor central.

Este método apresenta a vantagem de ser bastante simples e de possuir um baixo custo [2].



Figura 2.5: Sistema de visão estéreo PointGrey<sup>®</sup> Bumblebee XB3 [12].

## 2.2 Técnicas Experimentais de Medição de Deformações

### 2.2.1 Extensómetros

O extensómetro é um dispositivo que permite quantificar as extensões ocorridas num determinado ponto e segundo uma direção específica. Estes medem a variação da distância entre dois pontos, sofrida por uma determinada superfície aquando da sua deformação. É através da relação entre esta variação da distância e a distância inicial entre esses pontos que se obtém a medida da extensão ou deformação, conforme a equação 2.1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

Existem vários tipos de extensómetros, sendo o eléctrico resistivo um dos mais comuns. Estes baseiam-se na medição da deformação através da análise de alterações da resistência eléctrica sofridas por um condutor quando este é sujeito a uma dada deformação. São normalmente constituídos por um fino filamento ou tira de material metálico, disposto em forma de grelha. A disposição em grelha maximiza a quantidade de fio exposto à deformação, que atua em direção paralela ao mesmo. Esta grelha de condutor encontra-se fixa a uma base eletricamente isolada, que por sua vez é afixada ao material no qual se pretende medir a deformação. Assim, a deformação sofrida pela superfície é também experienciada pelo extensómetro, que por sua vez sofre uma variação na sua resistência eléctrica. Na figura 2.6 é possível observar a estrutura típica de um extensómetro eléctrico resistivo.

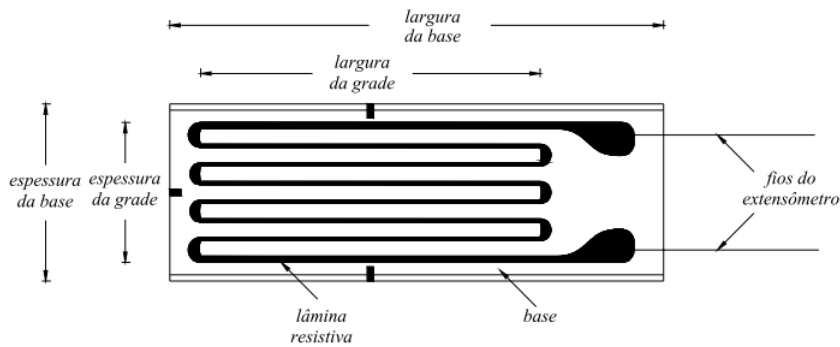


Figura 2.6: Esquema de construção típico de um extensómetro eléctrico resistivo [13].

As mudanças da resistência eléctrica nestes dispositivos têm uma magnitude bastante diminuta pelo que, para que estas sejam corretamente medidas, são utilizados circuitos eléctricos especiais. O circuito mais frequentemente utilizado na medida de pequenas variações de resistência denomina-se ponte de *Wheatstone* [13].

O uso de extensómetros para analisar as deformações é uma técnica bem documentada e que permite obter resultados de confiança. Contudo cada extensómetro tem de ser cuidadosamente aplicado e conectado, o que se pode revelar um processo moroso caso se pretenda analisar as deformações num grande número de zonas de uma superfície. Diversos autores dedicaram-se ao estudo detalhado deste tipo de mecanismos, como é o caso de Andolfato *et al.* [13].

## 2.2.2 Técnicas Óticas

### Fotoelasticidade

A Fotoelasticidade é uma técnica ótica de análise de tensões e deformações baseada numa propriedade que alguns materiais apresentam, denominada birrefringência ou refração

ção dupla temporária. Esta propriedade é típica de alguns materiais transparentes que não são isotrópicos do ponto de vista ótico. Contudo pode-se também manifestar em materiais óticamente isotrópicos, como é o caso do vidro e de certos polímeros, quando estes são submetidos a determinados esforços. A técnica consiste em aplicar um revestimento com as referidas propriedades à peça que se pretende analisar, e na incidência de luz polarizada sobre a mesma (proveniente de um equipamento apelidado de polariscópio), sendo posteriormente submetida às tensões em estudo. O efeito dos esforços exercidos sobre a peça em análise traduz-se no aparecimento de um tipo de padrões peculiares, denominados padrões de franjas, visíveis na Fig. 2.7 , através dos quais é possível inferir informações qualitativas e quantitativas relativas a todo o campo de tensão-deformação, por meio de metodologias específicas de análise óptica.

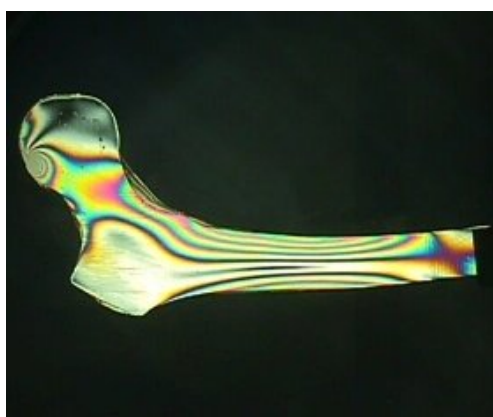


Figura 2.7: Análise Fotoelástica de um Fémur [14].

### Padrões de Moiré

Os padrões deste tipo são constituídos pela sobreposição de dois padrões de riscas com espaçamentos e orientações diferentes, cuja combinação resulta na produção de um terceiro padrão de riscas, habitualmente designadas por franjas. Pequenas alterações na orientação e posição das riscas dos padrões sobrepostos, causam grandes mudanças no padrão de franjas resultante, mudanças essas que são posteriormente usadas para quantificar as deformações que as originaram [15]. A formação de um padrão de Moiré básico pode ser observada na Fig. 2.8 (a).

Uma das técnicas que recorre ao uso deste tipo de padrões é a Interferometria de Moiré, bem documentada por vários autores, como é por exemplo o caso de H.Liu *et al* [18], em que esta é usada em testes de fadiga de juntas soldadas. Na Fig.2.8 (b) pode-se observar um padrão típico resultante da aplicação da referida técnica. Uma outra técnica baseada na análise dos ditos padrões de franjas é denominada de interferência de padrão electrónico de pontos<sup>1</sup>, em que um padrão salpicado de pontos é criado através da iluminação do objecto com duas frentes de onda paralelas, formadas por um aparelho denominado interferómetro e originadas por um laser. Estas duas frentes de onda formam dois padrões de pontos distintos sobre a superfície do objecto, padrões esses que interferem formando um terceiro ao nível do plano da imagem de uma câmara, usada

<sup>1</sup> *Electronic speckle pattern interference* em inglês.

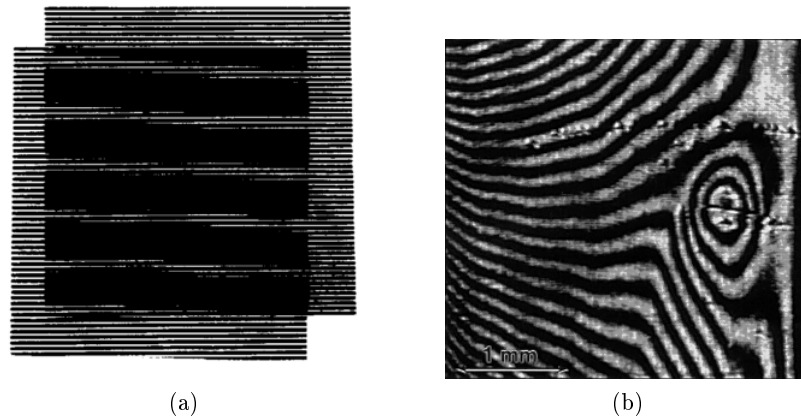


Figura 2.8: Formação de padrão Moiré básico [16] (a) e padrão resultante da aplicação da interferometria de Moiré na proximidade de uma fenda num composto laminado [17] (b).

como sensor. Ao ser submetida a uma força, a superfície analisada sofre deformações, e os padrões de pontos resultantes das duas frentes de onda sofrem também uma alteração, o que por sua vez origina uma mudança no padrão resultante da sua interferência. Ambos os padrões de interferência são processados e combinados por meio de software específico, resultando num padrão de franjas apelidado de interferograma, e através do qual é possível quantificar as deformações sofridas [19].

### Grelhas de Geometria Conhecida

Através da marcação de uma grelha de geometria conhecida numa dada superfície antes desta sofrer deformação, e analisando as alterações ocorridas na mesma devido ao processo de conformação, é possível obter informações que permitem concluir a distribuição das deformações principais ao longo da peça, bem como as suas direções, uma vez que a grelha acompanha necessariamente as mudanças ocorridas na superfície. O tipo de padrões utilizados pode variar, apresentando por exemplo uma geometria circular ou quadrangular, e podendo os elementos constituintes do mesmo apresentar uma maior ou menor dimensão. Estes padrões podem ser gravados na superfície recorrendo a diferentes técnicas, como por exemplo corrosão electroquímica (*electrochemical etching*) ou através de laser [20], como é o caso dos padrões visíveis na Fig. 2.9 (a) e (b).

A medição das alterações geométricas que permitem quantificar as deformações sofridas pode ser feita manualmente ou recorrendo a uma máquina de medição de coordenadas por pontos, como por exemplo em [22]. No entanto, com o desenvolvimento das técnicas de visão artificial é hoje em dia possível conjugar esta técnica com a utilização de algoritmos específicos de modo a obter as coordenadas tridimensionais dos pontos pertencentes à grelha, e posteriormente, inferir informação quanto ao seu campo de deformações.

As deformações são normalmente calculadas recorrendo a algumas suposições. Um exemplo disso é o caso de Sowerby [22], que recorre ao uso de uma grelha quadrangular, posteriormente subdividida em elementos triangulares, sendo que em cada um deles é assumida a ocorrência de um estado de deformação homogêneo, permitindo assim obter informações relativas às deformações ocorridas por meio de cálculos relativamente

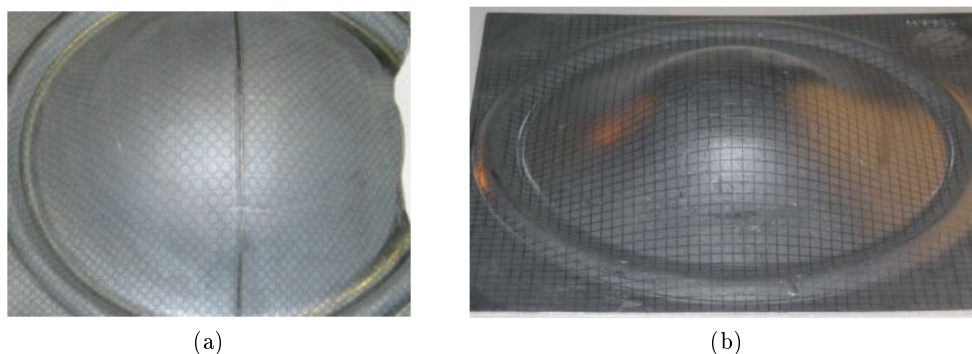


Figura 2.9: Superfícies marcadas com grelha de círculos (a) e grelha de quadriláteros (b) recorrendo a laser, e o seu aspecto após sofrerem deformação [21].

simples.

### Correlação Digital de Imagens

Outra das técnicas visuais de análise de deformações mais recentes, e que permite a obtenção de resultados tanto a duas como a três dimensões, denomina-se correlação digital de imagens. Esta baseia-se na aplicação dos mesmos princípios usados pela visão estéreo, mas com algumas peculiaridades no que toca à forma como é realizada a correspondência. Um padrão aleatório é aplicado na superfície a ser medida, como se pode ver na Fig. 2.10, podendo para tal ser usada uma comum lata de spray de cor negra.

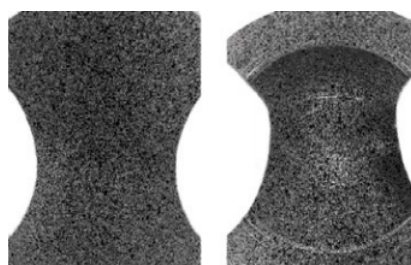


Figura 2.10: Provete marcado com padrão estocástico tipicamente utilizado em técnicas de correlação digital de imagens [23].

No que diz respeito à análise tridimensional, imagens da superfície são adquiridas por um par de câmaras, e algoritmos específicos de correlação permitem calcular a posição de pontos comuns a ambas as imagens, isto é, pontos correspondentes ao mesmo ponto físico. Normalmente uma das imagens é usada como referência. Esta é dividida em várias regiões com tamanhos típicos entre os  $20 \times 20$  e  $30 \times 30$  píxeis, sendo que para cada píxel da imagem existe uma região contendo os píxeis constituintes da sua vizinhança. Posteriormente é feita uma busca na outra imagem por regiões correspondentes às selecionadas. O processo de correspondência é baseado nos valores dos níveis de cinzentos dos píxeis constituintes de cada uma das regiões, valores esses tipicamente entre 0 e 255, e esta é calculada com base na aplicação de várias transformações de coordenadas entre imagens, e na minimização de uma função de custo específica [24].

Tal como na visão estéreo, é necessário um processo de calibração para obter algumas informações específicas das câmaras, bem como para que as suas posições e orientações relativas sejam conhecidas. Finalmente, a posição tridimensional de cada ponto da superfície é calculada. Através da variação da posição de cada ponto ao longo dos diferentes estágios de deformação, é calculado o respectivo campo dos deslocamentos e, consequentemente, é possível obter uma análise das deformações sofridas pela superfície.

### 2.3 Exemplos de Sistemas Comerciais para Análise de Deformações Existentes no Mercado

Atualmente existem várias aplicações de software capazes de proceder à reconstrução tridimensional de superfícies, bem como ao cálculo das deformações, baseados na aplicação de técnicas visuais, não envolvendo qualquer contacto. Muitas destas aplicações baseiam-se em algoritmos fotogramétricos e nos mesmos princípios utilizados na visão estéreo. Um exemplo disso é o ARGUS<sup>®</sup> da empresa GOM. Este software permite medir tanto as deformações como a redução de espessura de superfícies conformadas. Para tal um padrão de pontos regularmente espaçados é impresso na chapa antes da sua conformação, usando um processo eletrolítico. Após a conformação, objetos denominados calibradores são dispostos na superfície ou no seu redor, tal como é visível na Fig. 2.11(a), e são adquiridas imagens da superfície em diferentes perspectivas.

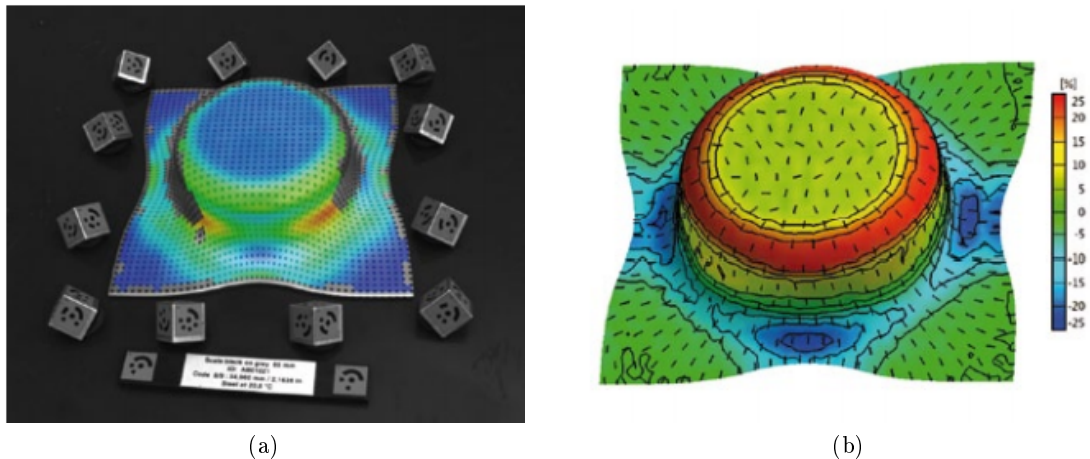


Figura 2.11: Na imagem (a) pode-se observar uma chapa após conformação, marcada com um padrão periódico de pontos, e rodeada por calibradores. A imagem (b) é uma representação dos resultados típicos obtidos com o software ARGUS, no que diz respeito à redução de espessura da superfície [25].

O propósito dos calibradores é permitirem o cálculo da posição e da orientação da câmara nas sucessivas posições de aquisição de imagens. O software processa as imagens e calcula a posição tridimensional dos vários pontos, e com base numa análise geométrica de diferentes parâmetros, como por exemplo a comparação da distância entre os pontos nos estágios de pré e pós-conformação, procede ao cálculo das deformações [26].



Outro sistema capaz de realizar análise de deformações a três dimensões é o ARAMIS<sup>®</sup>, também ele da GOM. Este baseia-se em técnicas de correlação digital de imagens para determinar pontos correspondentes entre imagens adquiridas por diversas câmaras durante os vários estágios de deformação.

Processos de calibração, de correlação de imagens e de triangulação são combinados de forma a obter as coordenadas tridimensionais da superfície a analisar com alta precisão. Através do cálculo destas coordenadas em cada estágio de deformação, é possível extrair os valores associados ao deslocamento espacial de cada ponto da superfície e, através de um análise geométrica, são concluídas as deformações sofridas em tempo real [27].

Na Fig. 2.12 (a) podem-se observar os resultados da distribuição das deformações principais mínimas, ocorridas durante a conformação de um provete marcado com um padrão estocástico, e obtidas recorrendo ao referido sistema acima. Já na Fig. 2.12 (b) é visível o *hardware* constituinte do sistema ARAMIS<sup>®</sup>.

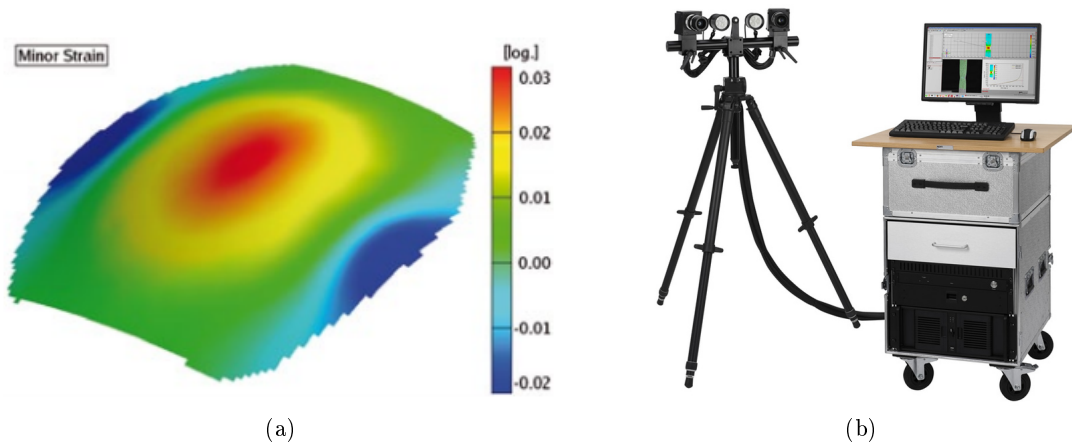


Figura 2.12: Em (a) é visível um tipo de resultados passíveis de obter com o software ARAMIS<sup>®</sup> [23] e em (b) o *hardware* integrante do dito sistema [28] .



## Capítulo 3

# Metodologia de Reconstrução 3D

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para obter os modelos tridimensionais de uma série de superfícies metálicas conformadas. Na Fig. 3.1 pode observar-se a sequência de etapas que constituem esta metodologia, possibilitando assim formar uma ideia geral de todo o processo. Posteriormente, e ao longo das várias secções que compõem o presente capítulo, é feita uma descrição pormenorizada de cada uma destas etapas.

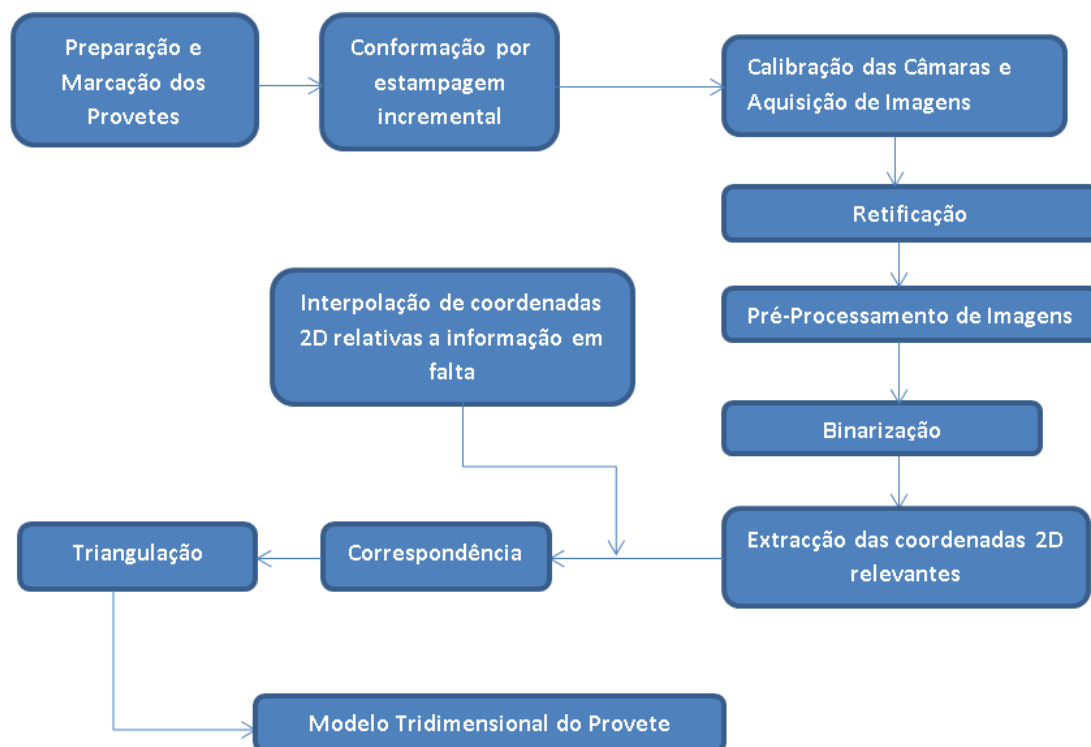


Figura 3.1: Diagrama resumo das várias etapas constituintes da metodologia de reconstrução adotada.

### 3.1 Seleção da Técnica a Utilizar

Para seleccionar a técnica de visão artificial a utilizar nesta dissertação foram tidos em conta uma série de factores. A existência no departamento de engenharia mecânica de equipamento próprio para marcação eletro-química de chapas com vários tipos de padrões de geometria regular foi talvez um dos factores mais determinantes. Optando pelo uso desta técnica de marcação, tornou-se claro que teria de se enveredar por uma metodologia que envolvesse a aquisição de imagens da superfície marcada, para de alguma forma proceder à análise das variações dimensionais sofridas durante o processo de conformação.

A visão estéreo desde logo se destacou pela sua aparente simplicidade, pois contrariamente a outras técnicas mais complexas, os requisitos materiais passam essencialmente pela utilização de uma ou duas câmaras, consoante a abordagem tomada. Além disso, esta técnica é facilmente combinável com algumas das metodologias de análise de deformações previamente referidas, como é o caso da análise de grelhas de geometria conhecida e da correlação digital de imagens. Esta segunda foi desde cedo posta de parte pois, além de recorrer a uma estratégia de marcação diferente, é uma técnica que pressupõe a aquisição de uma grande sequência de imagens durante todo o processo de conformação, e o que se definiu como pretendido foi um sistema o mais independente possível do processo de conformação, somente baseado na aquisição de imagens relativas ao estado final de conformação da peça.

### 3.2 Preparação e Marcação dos Provetes

Os provetes a conformar consistiram em placas metálicas aproximadamente quadrangulares com dimensões na ordem dos 20x20 centímetros. À partida, previu-se que a reflectividade resultante do tratamento superficial a que foram submetidas poderia mais tarde vir a causar alguns problemas, podendo eventualmente originar zonas de brilho intenso nas imagens adquiridas e inviabilizando assim a análise de parte da informação nelas contidas. Assim, com esse potencial problema em vista, as superfícies foram submetidas a um tratamento abrasivo recorrendo a uma lixadora eléctrica e a uma lixa de grão fino.

A técnica inicialmente utilizada para a marcação dos provetes foi a já referida marcação eletroquímica. Este é um dos métodos mais comuns de marcação de grelhas com vista à avaliação da deformabilidade devido (i) à sua fácil aplicação, (ii) ao facto de não causar distorções na superfície, (iii) à sua relação custo-eficiência e ainda devido (iv) à resistência e durabilidade que apresenta durante o processo de conformação [29]. Esta técnica requer o uso de uma fonte de alimentação de baixa tensão, um stencil contendo o padrão desejado, um tecido de feltro permeável, e uma solução própria para a marcação. A fonte de alimentação é ligada à superfície metálica a marcar, bem como a um eléctrodo, que normalmente assume a forma de um rolo. O stencil é então colocado na superfície, que deve ser limpa previamente. Este apresenta permeabilidade apenas nas zonas marcadas com o padrão. O tecido permeável é então colocado sobre todo o stencil, e posteriormente embebido na solução própria para marcação. Existem vários tipos de soluções dependendo do material que se deseja marcar, e por isso convém que esta seja escolhida adequadamente. De seguida, o tecido é pressionado com o eléctrodo cilíndrico e desta forma a solução alcança a superfície metálica e, como resultado da corrente presente no eléctrodo e na chapa, o padrão do stencil é gravado na sua superfície. Após a

gravação do padrão, a superfície deve ser banhada num agente neutralizante. O tempo necessário para gravar o padrão depende do material constituinte da chapa e da tensão aplicada durante o processo, sendo a intensidade da marcação proporcional ao tempo de aplicação [29]. Uma representação dos elementos intervenientes no processo pode ser observada na Fig. 3.2.

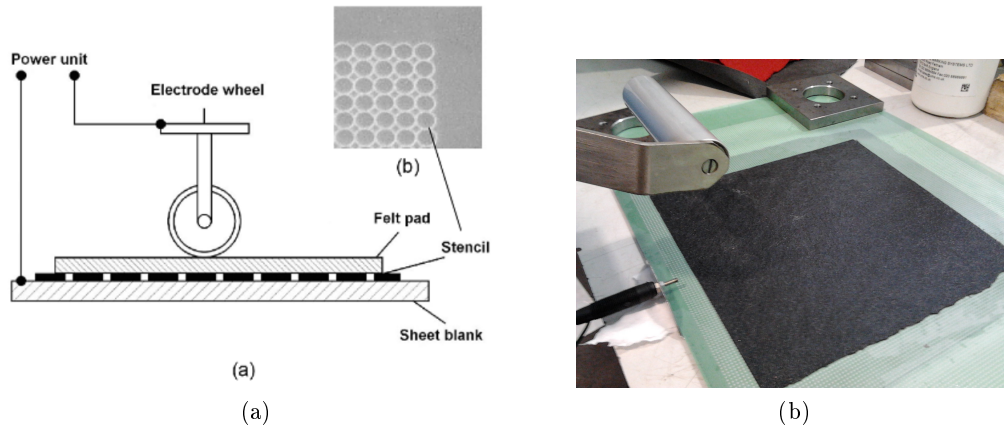


Figura 3.2: Na imagem (a) pode-se observar: (a) Representação esquemática do processo de gravação eletro-química, (b) exemplo de stencil com padrão de círculos [29]. Na imagem (b) é possível observar algum do material de marcação eletro-química utilizado, nomeadamente o stencil, o tecido e o eléctrodo.

Foram realizadas várias experiências recorrendo a este método, e ao uso de stencils contendo um padrão de pontos circulares. Contudo, os resultados obtidos não foram os melhores. Pelo que se pode apurar, este processo não se revelou satisfatório para a marcação de superfícies metálicas de cor clara ou constituídas por materiais relativamente resistentes aos processos de oxidação, como é o caso do alumínio, uma vez que o padrão resultante da gravação neste tipo de material apresenta também ele uma cor clara. Relativamente ao uso desta técnica na marcação de superfícies de aço, verificou-se que em alguns casos nem toda a superfície ficava devidamente marcada, ocorrendo a existência de zonas onde os pontos não eram marcados, ou em que estes apresentavam um contraste bastante diminuto. Além disso, eram frequentemente visíveis manchas irregulares de oxidação.

Estes problemas podem-se dever a uma série de factores. O sistema de gravação utilizado possui uma grande variedade de modos de marcação para diferentes materiais, bem como um conjunto de parâmetros reguláveis, que podem não ter sido selecionados da melhor forma. Além disso, a utilização das soluções de marcação e de neutralização pressupõe algum controlo temporal e alguma experiência no seu manuseamento. Por estes motivos, e dados os resultados pouco satisfatórios, decidiu-se optar por uma alternativa capaz de proporcionar mais garantias a curto prazo e uma melhor repetibilidade.

Pensou-se em utilizar uma caneta permanente de ponta fina para efetuar a marcação manual dos padrões. Contudo, e como esta seria uma tarefa morosa e certamente não muito precisa, decidiu-se usar um robô industrial FANUC para realizar a marcação, ao qual foi acoplada a referida caneta. A variedade dos tipos de padrões utilizados nesta técnica é grande, tanto no que diz respeito às formas geométricas que os constituem

como às dimensões e espaçamento entre as mesmas. Neste caso decidiu-se optar pela seleção de dois padrões, um de pontos circulares e outro de quadrículas, ambos com um espaçamento de 4 milímetros.

Foram então programadas duas rotinas, uma para marcação de um padrão de pontos e outra para marcação de um padrão de quadrículas. Na Fig. 3.3 é possível observar o decorrer de uma rotina de marcação de pontos utilizando o robô FANUC do Laboratório de Automação e Robótica.

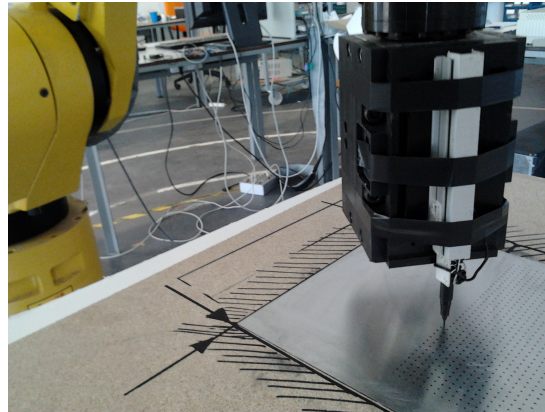


Figura 3.3: Marcação de padrão de pontos utilizando robô industrial FANUC.

Com vista a possibilitar a posterior análise de diferentes tipos de resultados, e a perceber as limitações do sistema desenvolvido, decidiu-se que se iria proceder à conformação de 3 tipos diferentes de geometrias. Uma geometria esférica, uma geometria piramidal com paredes de inclinação pouco acentuada e, por fim, uma geometria cônica com paredes de declive mais acentuado. Foram então marcadas um total de 6 chapas de alumínio, metade com um padrão de pontos e a outra metade com um padrão quadriculado. A razão para a escolha do alumínio como material de eleição prendeu-se exclusivamente com a sua cor clara, e com o melhor contraste da grelha marcada, por ela possibilitada.

É de referir que a metodologia de marcação adotada não é de forma nenhuma recomendada para utilização em processos de estampagem envolvendo punção e matriz, já que o padrão marcado não apresenta uma boa resistência ao toque nem aos traumas tipicamente sofridos pelas superfícies envolvidas nesse tipo de processos. No entanto, para o presente caso, isso não representa um problema, já que se recorre a um processo de estampagem incremental, não envolvendo punção e matriz, e uma vez que o contacto entre a ferramenta e o provete se dá unicamente numa das faces do mesmo, face essa sem qualquer tipo de marcação.

### 3.3 Descrição Sumária do Processo de Conformação

Com vista a tomarem a forma pretendida, os provetes foram submetidos a um processo de estampagem incremental, numa máquina desenvolvida na Universidade de Aveiro e integrada no projeto SPIF-A, ou Single Point Incremental Forming - Aveiro [30].

Este processo de estampagem é relativamente inovador, contudo simples. A deformação é obtida através da força exercida por uma ferramenta na superfície a deformar, que se encontra fixa num suporte próprio, ao longo de uma trajetória pré-programada,

e que varia consoante a geometria desejada (Fig. 3.4 (a)). Esta ferramenta consiste de uma simples haste cilíndrica de ponta plana ou esférica. É portanto um processo que não envolve a utilização de moldes ou matrizes. Como se pode observar na Fig. 3.4 (b), a ferramenta encontra-se acoplada a uma plataforma, que é por sua vez accionada por meio de sistemas de atuação hidráulica.

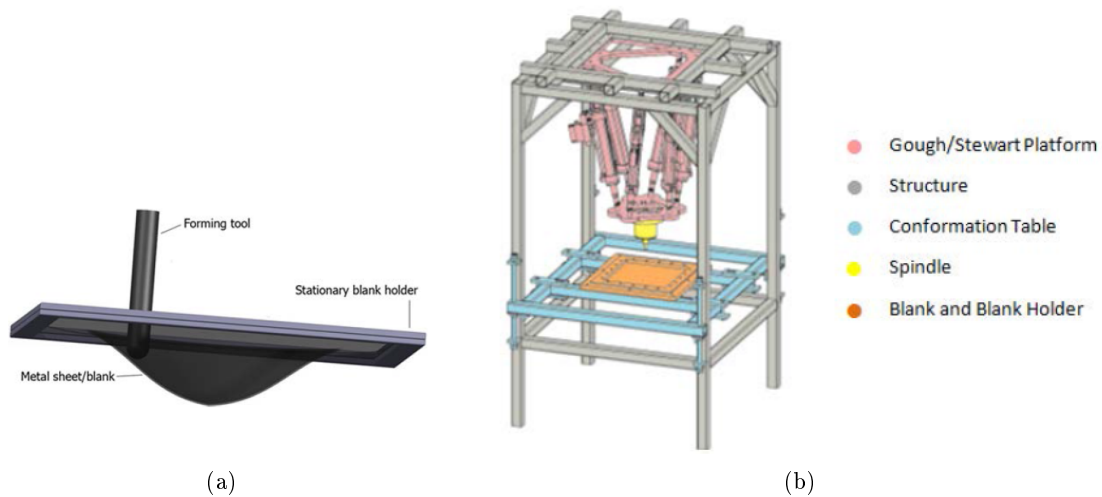


Figura 3.4: Na imagem (a) é visível a ferramenta e o seu princípio básico de atuação e na imagem (b) pode-se observar uma representação esquemática simplificada da SPIF-A [30].

Para além de geometrias básicas, este processo também permite a conformação de superfícies com geometrias mais complexas, como é o caso das observáveis na Fig.3.5.

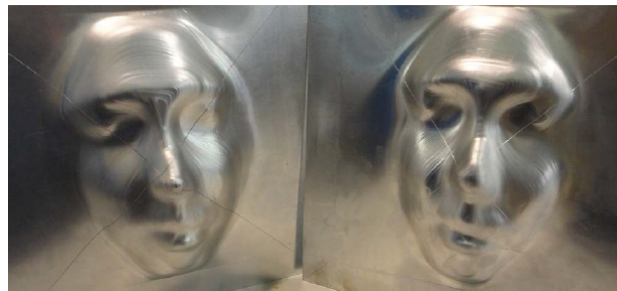


Figura 3.5: Superfícies de geometria complexa obtidas pelo processo de estampagem incremental [30].

O resultado final do processo de conformação das seis superfícies é visível na Fig.3.6, na qual se podem observar na parte superior os provetes marcados com o padrão de quadrículas, e na parte inferior os provetes marcados com o padrão de pontos.

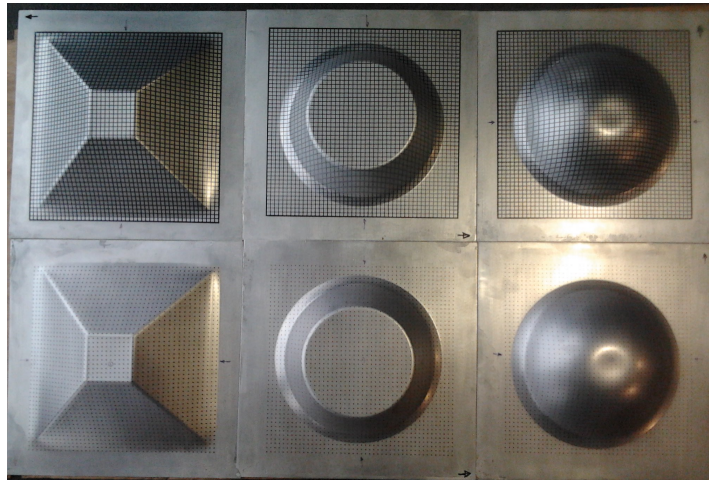


Figura 3.6: 6 provetes conformados, de acordo com 3 tipos de geometrias e marcados com 2 tipos de padrões.

### 3.4 Descrição do Hardware e do Ambiente de Aquisição de Imagens

De entre as várias abordagens possíveis à aplicação de uma metodologia baseada em visão estéreo, decidiu-se optar pela utilização de um sistema típico de visão binocular estático, principalmente devido à sua simplicidade e ao facto dos princípios teóricos relativos ao seu modo de funcionamento estarem bem documentados na literatura. Segue-se uma breve descrição do hardware constituinte do sistema de aquisição de imagens.

#### 3.4.1 Sensores Utilizados

O sensor ótico inicialmente utilizado foi a bumblebee XB3. No entanto mais tarde verificou-se a possibilidade de utilizar dois sensores Genie M1600 da Teledyne Dalsa (Fig. 3.7), de resolução  $1600 \times 1200$ , gentilmente cedidos pela empresa de componentes de visão artificial Infaimon<sup>®</sup>.



Figura 3.7: Sensor Genie M1600 da Teledyne Dalsa [31].



Estes foram fornecidos conjuntamente com óticas 8mm HR 2/3"F1.4 da Goyo, e com uma placa PCI-E Giga-Ethernet com duas entradas, própria para permitir a comunicação entre os sensores e o computador.

### 3.4.2 Ambiente de Aquisição de Imagens

A aquisição de imagens é certamente uma das partes mais importantes de entre as várias etapas que conduzem à obtenção de um modelo estéreo 3D, já que uma má aquisição levará invariavelmente ao uso de informação de pobre qualidade como ponto de partida, o que poderá diminuir a qualidade do modelo obtido, ou até impossibilitar a sua obtenção. A iluminação é um dos fatores mais cruciais em qualquer sistema de visão industrial [32].

De acordo com [33] podem-se destacar algumas recomendações gerais no que toca às condições de iluminação:

- Manter a iluminação constante e imutável ao longo do tempo;
- Manter a iluminação consistente, evitando a formação de sombras ou de zonas demasiado brilhantes;
- Capturar a forma do objecto recorrendo a iluminação que optimize o seu contraste e que a separe do *background*;
- Reduzir ao mínimo o efeito de luzes interiores, luz solar ou outras fontes de iluminação ambiente;
- Escolher uma técnica e fonte de iluminação apropriada para o tamanho, forma, textura, cor, transparência reflectividade e tolerância ao calor do objeto alvo da aquisição;
- Ajustar adequadamente o tempo de exposição da câmara.

Relativamente aos tipos de iluminação adequados à aplicação em sistemas de visão industrial, destacam-se a iluminação fluorescente, Fibra ótica, LED, Mercúrio, Xenon e Sódio de alta pressão (HPS), sendo as três primeiras as que são mais amplamente usadas em sistemas de pequeno e médio porte, contrariamente às três restantes, que são mais frequentemente usadas em aplicações de grande escala ou que necessitam de fontes de iluminação de grande intensidade [34]. Na Fig. 3.8 é visível a comparação entre alguns critérios pertinentes na escolha do tipo de iluminação adequado.

Tendo em mente alguns destes aspetos, procedeu-se à construção de uma estrutura adequada para a fixação das câmaras, e que possibilitasse ao mesmo tempo a manutenção de condições de iluminação o mais homogêneas possíveis ao longo das várias aquisições de imagens. Para isso, montou-se um suporte para a sustentação dos sensores, passível de ser regulado para permitir a alteração da posição e da orientação dos mesmos. À volta do suporte construiu-se uma câmara fechada com o propósito de isolar o melhor possível o ambiente de aquisição do ambiente exterior. Foram adquiridas duas barras de luzes LED de 8 Watts cada. Estas foram colocadas por de trás das câmaras, direcionadas para uma superfície de cor branca colocada na sua retaguarda, de modo a não iluminar diretamente as superfícies conformadas e diminuindo assim a probabilidade de ocorrência de zonas de brilho intenso.

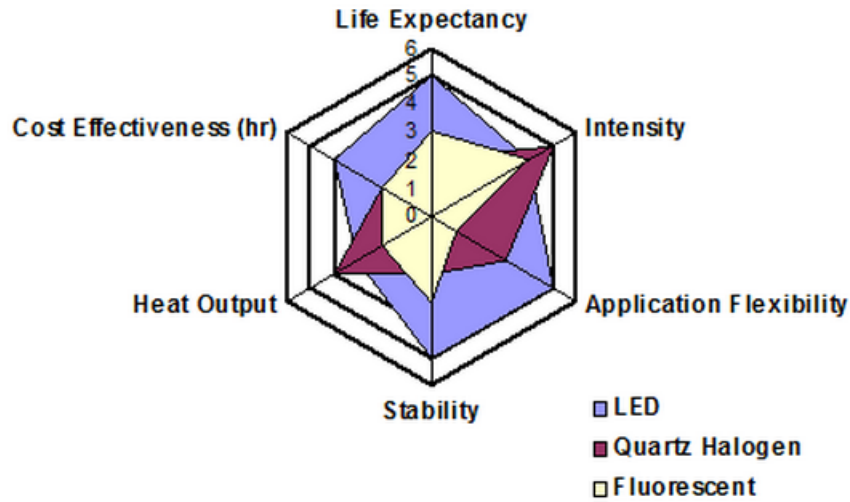


Figura 3.8: Critérios de seleção relevantes na escolha do tipo de iluminação a aplicar a um sistema de visão industrial [34].

O interior da estrutura foi também ele forrado com cartolina de cor branca, para ajudar a fornecer iluminação difusa vinda de todas as direções. Na Fig. 3.9 é possível observar o resultado final com as câmaras montados em duas disposições distintas.

Instalada a placa Ethernet e feita a conexão das câmaras, bem como a devida configuração de IPs, o processo de aquisição de imagens foi feito recorrendo ao aplicativo Spera CamExpert da Teledyne Dalsa<sup>®</sup>, também ele cedido pela Infaimon<sup>®</sup>. O software permite a fácil interação entre o computador e as câmaras, permitindo ajustar uma série de parâmetros como, por exemplo, a *framerate* e o ganho dos sensores. Um exemplo de um par estéreo de um dos provetes é visível na Fig. 3.10.



(a)



(b)

Figura 3.9: Ambiente de aquisição de imagens, constituído pela estrutura de suporte dos sensores, iluminação e câmara de isolamento visto do exterior (a) e do interior (b) .

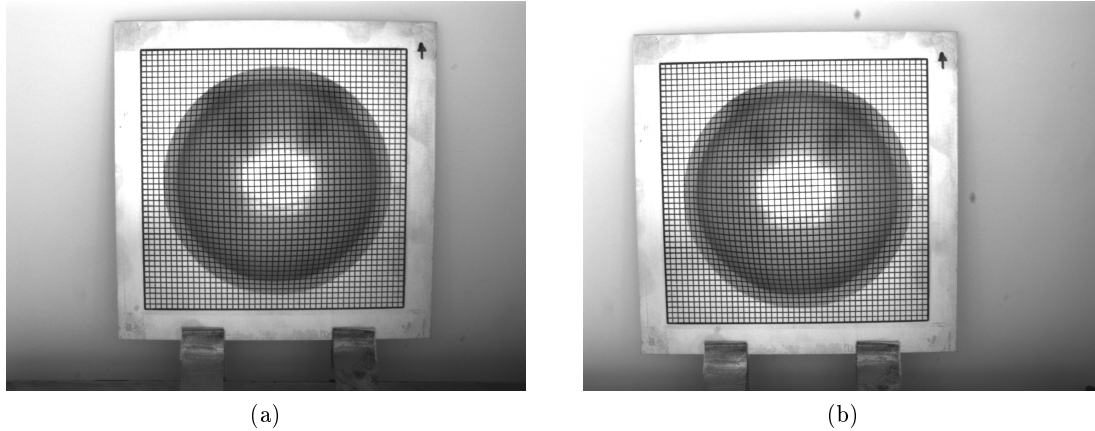


Figura 3.10: Aquisição de par estéreo de um provete marcado com um padrão de quadrículas e conformado com geometria esférica. A imagem (a) corresponde à aquisição efectuada pelo sensor esquerdo e a imagem (b) corresponde à aquisição por parte do sensor direito.

### 3.5 Reconstrução Estéreo

A generalidade dos processos de reconstrução por meio de visão estéreo estão divididos em três grandes fases: a calibração, correspondência e por fim a triangulação. Segue-se a descrição das várias etapas realizadas no sentido de obter um modelo 3D viável para posterior análise das deformações ocorridas durante o processo de conformação.

#### 3.5.1 Calibração das Câmaras

A calibração é geralmente descrita como o processo de obtenção das características internas, geométricas e óticas, relativas à câmara, bem como a obtenção da sua posição tridimensional e orientação relativamente a um referencial global [35]. Estas informações constituem respetivamente os chamados parâmetros intrínsecos e extrínsecos. Assim, o propósito da calibração é estabelecer a relação entre as coordenadas tridimensionais do mundo e as coordenadas bidimensionais correspondentes, tal como são vistas no computador [35].

#### Modelo da Câmara

A maioria das técnicas usadas no procedimento de calibração das câmaras baseiam-se no modelo *pinhole* [35]. Este define um conjunto de parâmetros de calibração extrínsecos constituídos por uma matriz de rotação  $\mathbf{R}$  e um vector de translação  $\mathbf{t}$ , e que permitem a transformação entre o sistema de coordenadas do mundo e o sistema tridimensional de coordenadas associado à câmara. O modelo relaciona ainda as coordenadas tridimensionais da câmara com as coordenadas do plano da imagem, por meio de parâmetros intrínsecos que incluem a modelação da distorção radial e tangencial provocada pelas lentes [35].

No modelo *pinhole*, visível na Fig.3.11, os raios convergem todos para um ponto, o centro da câmara, também conhecido como centro ótico  $\mathbf{C}$ . A distância deste ponto ao

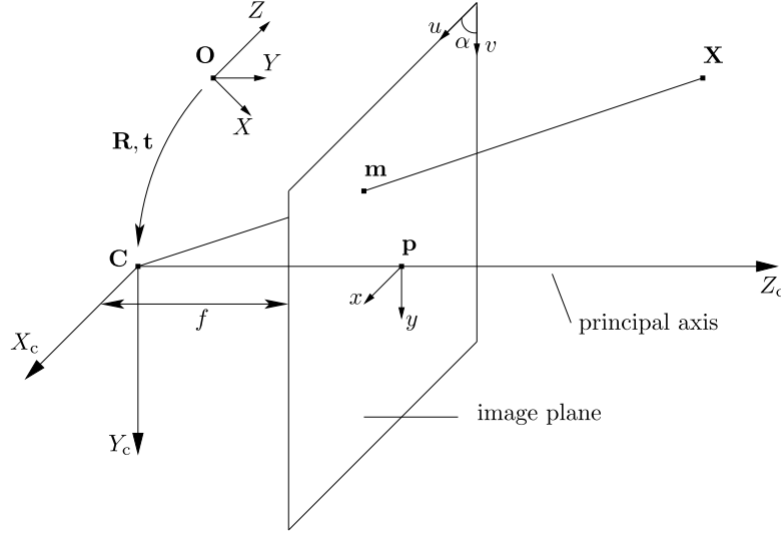


Figura 3.11: Modelo de câmera *pinhole* [36]

plano da imagem é designada de distância focal  $f$ . Por meio de semelhança de triângulos é possível concluir que o ponto  $\mathbf{X}$  de coordenadas  $(X_c, Y_c, Z_c)^T$  relativas ao referencial da câmera, é projetado no referencial da imagem com as coordenadas  $(fX_c/Z_c, fY_c/Z_c)^T$ . Esta relação pode ser representada em termos homogêneos pela seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \simeq \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

As coordenadas na imagem  $(x, y)$  são por sua vez convertidas em coordenadas de píxeis por:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \simeq \begin{bmatrix} m_u & -m_u \cot \alpha \\ 0 & \frac{m_v}{\sin \alpha} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

O ponto principal  $\mathbf{p}$  resulta da intersecção entre o eixo principal e o plano da imagem, e as suas coordenadas são representadas por  $(u_0, v_0)^T$ . O ângulo formado entre os eixos  $u$  e  $v$  é designado por  $\alpha$ , que assume o valor convencional de  $\frac{\pi}{2}$ , e  $m_u$  e  $m_v$  são respectivamente o número de píxeis por unidade de distância nas direções  $u$  e  $v$ .

Normalmente um ponto é definido pelas suas coordenadas tridimensionais relativamente a um referencial mundo, diferente do referencial câmara. A transformação entre estes é conseguida por meio de uma matriz de rotação  $\mathbf{R}_{3 \times 3}$  e por um vector de translação  $\mathbf{t}_{3 \times 1}$ , que juntos constituem a matriz dos parâmetros extrínsecos.

O mapeamento do ponto  $\mathbf{X}$  para a sua representação na imagem  $\mathbf{m}$  é dado pela

expressão seguinte:

$$\mathbf{m} \simeq \begin{bmatrix} m_u & -m_u \cot \alpha & u_0 \\ 0 & \frac{m_v}{\sin \alpha} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} m_u f & m_u s f & u_0 \\ 0 & m_u \gamma f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \mathbf{X}, \quad (3.3)$$

onde  $\gamma = \frac{m_v}{m_u \sin \alpha}$  e  $s = -\cot \alpha$ . Considerando  $m_u = 1$  pode-se então escrever a equação de projeção sob a seguinte forma matricial:

$$\mathbf{m} \simeq \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \mathbf{X}. \quad (3.4)$$

A matriz  $\mathbf{K}$  é designada de matriz de calibração da câmara e nela estão contidos os seus parâmetros intrínsecos. Esta pode assumir a seguinte representação:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & s f & u_0 \\ 0 & \gamma f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Para obter um modelo tridimensional por meio de visão estéreo, é essencial a determinação dos parâmetros de calibração acima referidos. Para isso é necessário recorrer a uma das várias técnicas de calibração existentes.

### Procedimento de Calibração

Uma das técnicas de calibração mais comuns faz uso de um padrão regular e de dimensões conhecidas, como por exemplo um padrão axadrezado. Para efetuar o procedimento recorreu-se à *Camera Calibration Toolbox for Matlab*<sup>®</sup> [37]. Esta é uma *toolbox* de uso livre para ambiente Matlab, e inclui um conjunto de funções que permitem calibrar uma ou mais câmaras, bem como algumas funções úteis para aplicações de visão estéreo. O padrão utilizado contém  $9 \times 7$  zonas de reconhecimento quadradas, cada uma com 15 milímetros de lado.

No sentido de constatar a influência do *baseline* na qualidade dos resultados obtidos, decidiu-se efetuar as 6 aquisições correspondentes a cada um dos provetes, recorrendo a três disposições diferentes das câmaras, totalizando assim 18 aquisições, 6 por cada configuração. As várias disposições das câmaras diferenciaram-se pela distância relativa entre elas, distinguindo-se assim pelo *baseline* curto, intermédio e longo. Assim sendo, foi necessário efetuar a calibração para cada uma das três disposições diferentes, e uma vez que os parâmetros extrínsecos se alteram obrigatoriamente com a mudança de posição, cada grupo de 6 aquisições sucedeu obviamente ao procedimento de calibração correspondente.

O procedimento de calibração para cada configuração foi levado a cabo através da aquisição de 18 pares de fotos de um padrão axadrezado em diversas posições e orientações. Para calibrar o sistema estéreo foi primeiramente necessário calibrar individualmente cada uma das câmaras chamando a interface de calibração individual *calib\_gui* e efetuando a calibração manualmente. Na Fig. 3.12 é possível observar a interface de

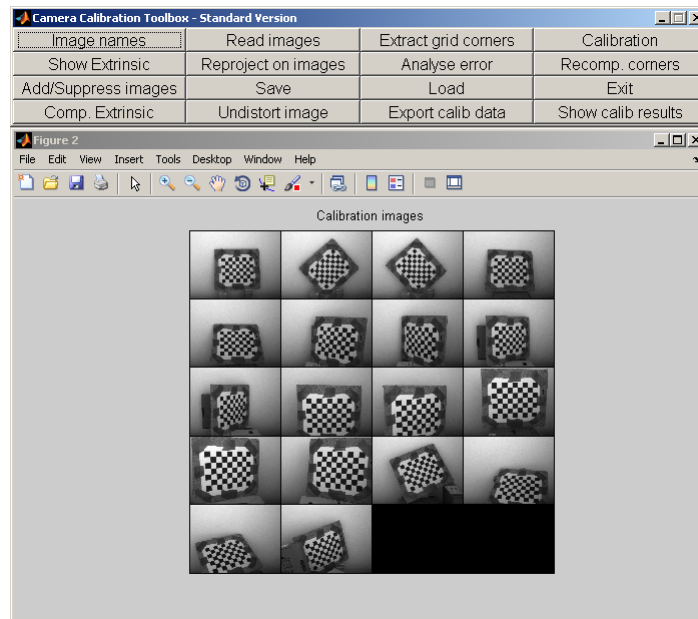


Figura 3.12: Interface de calibração individual e imagens usadas na calibração da câmera esquerda, na configuração de *baseline* intermédio.

calibração individual, bem como as 18 imagens usadas na calibração da câmera esquerda, na configuração de *baseline* intermédio.

A Fig. 3.13 ilustra o processo manual de calibração, em que são selecionados os quatro cantos da zona de interesse, através dos quais é inferida a localização aproximada dos cantos das várias quadrículas (a) e posteriormente a sua localização efetiva (b), ambas marcadas a vermelho.

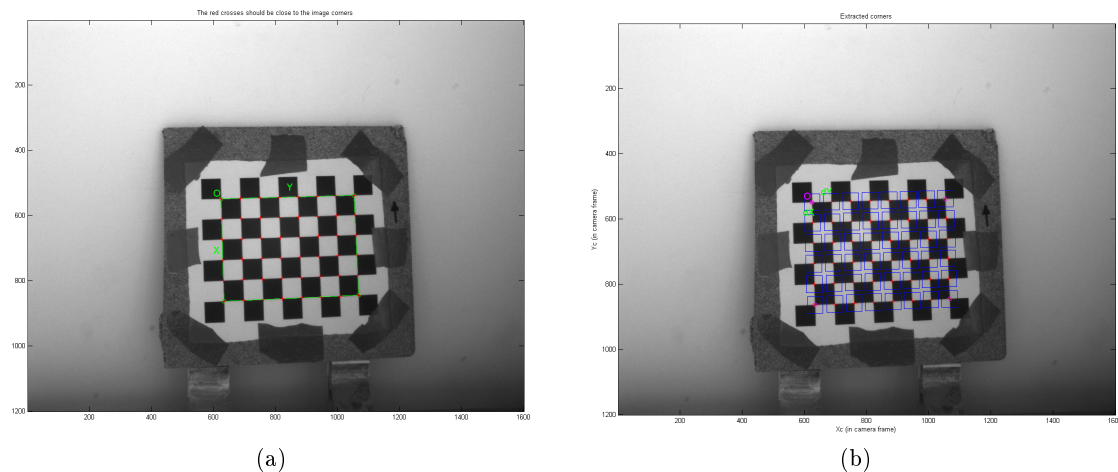


Figura 3.13: Processo de calibração individual. A imagem (a) ilustra a seleção da região de interesse, bem como a localização aproximada dos cantos das quadrículas nela contidas. Na imagem (b) observa-se a sua localização efetiva.

Após a extração das coordenadas de todas as imagens e feito o processamento, é

possível visualizar toda a informação obtida, nomeadamente o erro de reprojeção em píxeis, que pode funcionar como indicador de qualidade da calibração (Fig. 3.14). Feita a calibração individual de cada câmara para cada configuração, foram gravados os dados obtidos em ficheiros com a designação *Calib\_results\_left.mat* e *Calib\_results\_right.mat*.

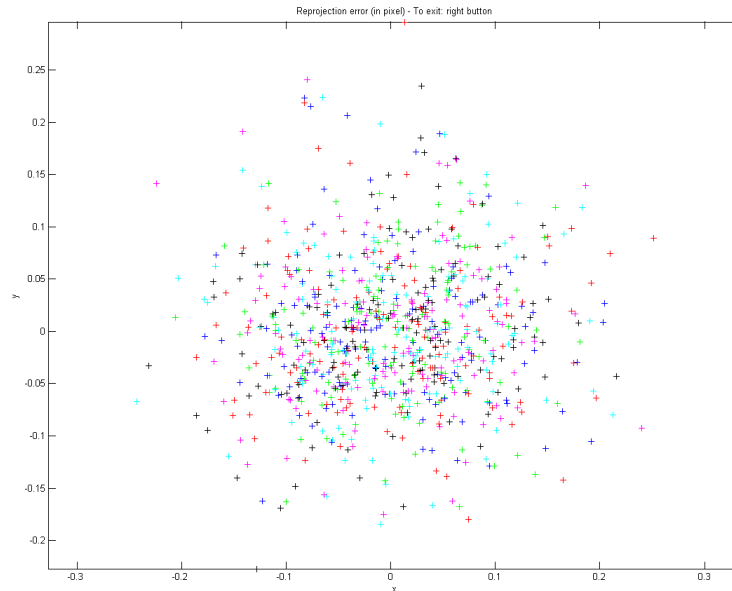


Figura 3.14: Erro de reprojeção em píxeis relativo à calibração individual da câmara direita para a configuração de *baseline* intermédio.

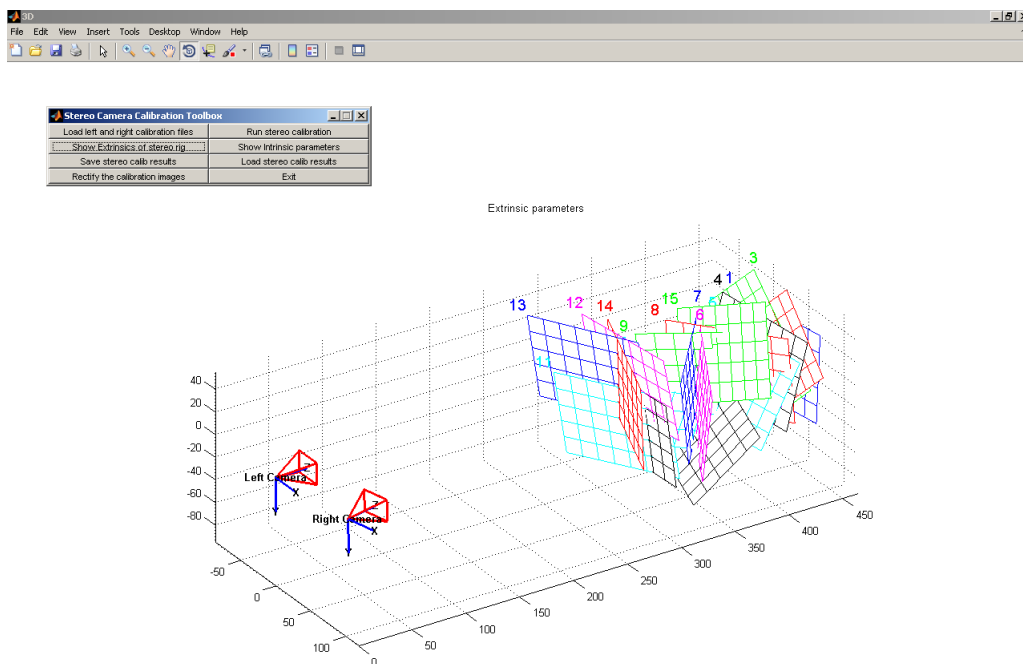


Figura 3.15: Interface de calibração estéreo e representação tridimensional dos parâmetros extrínsecos.

Posteriormente, e para cada configuração, foram carregados os dois ficheiros de calibração individuais recorrendo à interface de calibração estéreo *stereo\_gui*. Esta correlaciona os dados neles contidos, permitindo assim a obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos associados a cada uma das configurações estéreo. Na Fig. 3.15 pode-se observar a interface de calibração estéreo, bem como os parâmetros extrínsecos, representados tridimensionalmente pela posição das câmaras e do padrão axadrezado nas 18 posições. A representação gráfica dos parâmetros extrínsecos de cada uma das configurações pode ser consultada no anexo A.1, Fig. A.1 e Fig. A.2.

Por fim, todos os parâmetros obtidos com o procedimento, inclusive aqueles relativos à modelação da distorção associada a cada câmara, foram guardados num ficheiro *Calib\_Results\_stereo.mat*, existindo um para cada configuração estéreo.

### 3.5.2 Retificação

A retificação estéreo consiste na transformação de duas imagens da mesma cena, de maneira a que para cada par de píxeis correspondentes ao mesmo ponto físico, um de cada imagem, ambos se encontrem alinhados ao longo do mesmo eixo horizontal [38]. Este procedimento resulta ainda na remoção da distorção tangencial e radial causada pelas óticas. Assim, e idealmente, após a retificação, as coordenadas nas duas imagens de dois píxeis correspondentes diferenciam-se unicamente pelo seu deslocamento horizontal, apelidado de disparidade, e através do qual é possível inferir a profundidade do ponto físico em questão. Efetuada a retificação, o processo de busca por píxeis correspondentes fica então resumido a uma procura unidimensional ao longo do mesmo eixo horizontal, o que constitui a chamada restrição epipolar, e que trás grandes vantagens relativamente à eficiência e ao tempo de processamento dos algoritmos de correspondência estéreo [39]. Na Fig. 3.16 é possível observar a geometria epipolar existente entre duas câmaras.

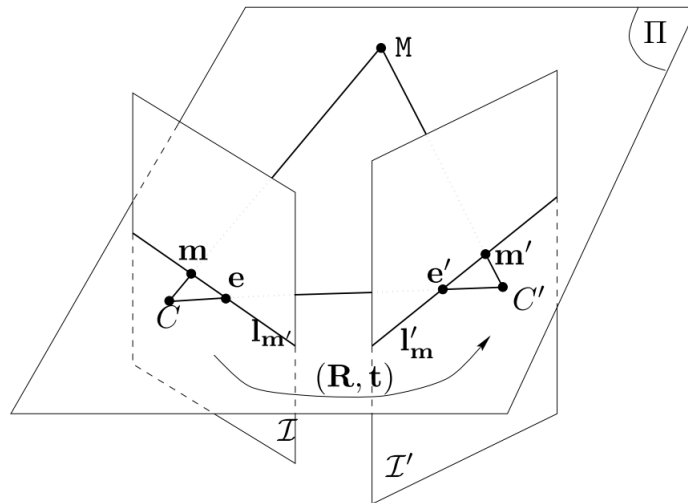


Figura 3.16: Geometria epipolar entre duas câmaras [40].

$C$  e  $C'$  representam os centros óticos das duas câmaras. Dado o ponto  $m$  pertencente à imagem  $I$ , o seu ponto correspondente na imagem  $I'$  está obrigatoriamente contido



numa linha, apelidada de linha epipolar de  $\mathbf{m}$ , e representada por  $l'_m$ . Esta linha é a intersecção do plano  $\Pi$ , definido por  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{C}'$ , e chamado de plano epipolar, com o plano da imagem  $I'$ . O epipolo  $\mathbf{e}'$  resulta da intersecção do segmento de recta  $\mathbf{CC}'$  com o plano da imagem  $I'$ , e é neste ponto que passam todas as linhas epipolares dos pontos da imagem  $I$  [40]. Assim, em termos de geometria epipolar, o processo de retificação consiste em aplicar uma transformação a cada plano da imagem de forma a que pares de linhas epipolares conjugadas se tornem colineares e paralelas a um dos eixos da imagem, normalmente o horizontal, e as imagens retificadas podem ser vistas como aquelas passíveis de obter por um novo sistema estéreo em que as câmaras sofreram uma rotação [41].

### Procedimento

A *toolbox* usada na calibração permite proceder à retificação de imagens usadas na calibração, ou de um qualquer par de imagens adquirido numa das configurações, desde que carregado o ficheiro *Calib\_Results\_stereo.mat* contendo os dados da respectiva calibração estéreo. A função da *toolbox* responsável pela retificação é *rectify\_stereo\_pair.m*, e quando executada, procede por defeito à retificação das imagens usadas na calibração. No entanto contém também o código que permite o seu uso para retificar um qualquer par de imagens, embora inativo. Assim, para mais facilmente proceder à retificação dos vários pares de aquisições, procedeu-se à criação de uma função *rectify\_stereo\_pair2.m* inteiramente baseada na primeira, mas que usa a parte do código acima referida, e contendo pequenas alterações para facilitar o seu uso. Foram introduzidos 5 parâmetros de entrada: o destino e nome das duas imagens a retificar, das imagens retificadas resultantes e do ficheiro contendo os dados da calibração estéreo.

A execução de ambas as funções origina automaticamente a criação de um ficheiro do tipo *Calib\_Results\_stereo\_rectified.mat* contendo as informações da configuração estéreo após retificação, existindo igualmente um para cada uma das configurações.

Na Fig.3.17 é possível observar um par estéreo retificado, correspondente à aquisição do provete de forma esférica marcado com o padrão quadriculado, e na configuração de *baseline* intermédio. A linha a vermelho representa as duas linhas epipolares associadas ao ponto físico pertencente ao canto superior esquerdo do padrão marcado, colineares e paralelas ao eixo horizontal.

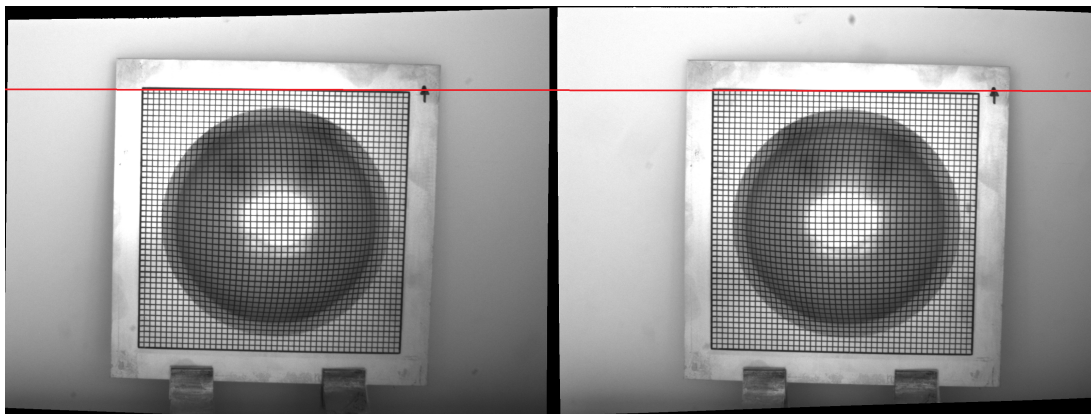


Figura 3.17: Par estéreo retificado de um provete com forma esférica.

### 3.5.3 Pré-Processamento de Imagens

Apesar de ter sido feito um esforço para alcançar as condições de aquisição ideais, especialmente no que diz respeito ao controlo das condições de iluminação, verificou-se que em algumas das imagens havia uma grande perda de contraste em certas zonas dos provetes. Um exemplo disso é a Fig. 3.18, onde é visível o efeito de escurecimento e diminuição do contraste resultante da variação da inclinação da superfície. A principal causa deste efeito deve-se ao facto da iluminação ser maioritariamente proveniente de um único local. Apesar da incidência de luz indireta e do revestimento de cor branca da zona de aquisição terem contribuído positivamente para atenuar o efeito dos brilhos localizados, estes não foram por si só suficientes para conferir à peça uma iluminação igualmente distribuída. Uma medida que poderia eventualmente contribuir para a diminuição deste efeito seria a reestruturação da câmara onde ocorreu a aquisição, de maneira a apresentar uma geometria em forma de cúpula, também ela de cor branca, em conjunto com estratégias de iluminação indireta, permitindo assim uma igual distribuição da luz por toda a superfície dos provetes. No entanto, existem estratégias de tratamento e processamento de imagem apropriadas para este tipo de situações.

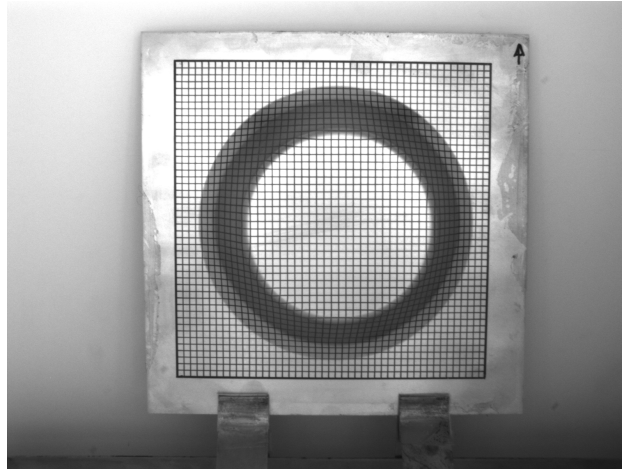


Figura 3.18: Efeito da distribuição desigual de luz pela superfície de um provete de geometria cónica.

Uma das técnicas de pré-processamento de imagem existentes é a filtragem digital recorrendo a um filtro homomórfico. A filtragem homomórfica é uma técnica de normalização bem conhecida, que melhora a aparência de uma imagem através de uma melhoria do contraste e de uma compressão da amplitude dos níveis de cinzento [42]. Esta técnica usa um modelo de iluminação-reflectância, que considera que uma imagem pode ser dividida em duas componentes principais, sendo a primeira componente a quantidade de iluminação incidente na cena observada, e a segunda a reflectância do objecto presente na cena, isto é, a razão entre a luz refletida e a luz incidente [43]. Uma dada imagem  $f(x, y)$  pode então ser definida pela seguinte expressão:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y). \quad (3.6)$$

Neste modelo considera-se que  $i(x, y)$  apresenta mais componentes de baixa frequên-

cia do que  $r(x, y)$ , pois a sua intensidade varia mais lentamente. Assim, esta técnica tem como objectivo reduzir a significância do elemento  $i(x, y)$  através da redução das componentes de baixa frequência da imagem. O processo de filtragem é então executado no domínio da frequência. Para tal o domínio espacial da imagem é primeiramente convertido para o domínio da frequência por meio de funções de transformação, como por exemplo a transformada de Fourier, isto após a multiplicação presente na expressão 3.6 ser convertida para uma adição por meio de funções logarítmicas [43].

As funções de filtragem homomórfica usadas no decorrer deste trabalho fazem parte de uma *toolbox* de reconhecimento facial abertamente disponível para Matlab, *The INface toolbox v2.0 for illumination invariant face recognition* [44]. Para proceder à filtragem foi usada a função *homomorphic.m* integrante da biblioteca acima referida, bem como as sub-funções de filtragem, truncagem e normalização a ela associadas. Esta possui 5 parâmetros de entrada, para além da imagem a ser processada, são eles :

- *Boost* - O rácio de *boost* que os valores de alta frequência sofrem relativamente aos valores de baixa frequência;
- *Cutoff* - A frequência de corte do filtro ( 0 - 0.5 );
- *Order* - A ordem do filtro de Butterworth modificado usado (número inteiro maior que 1);
- *Lhistogram\_cut* - A percentagem da parte inferior do histograma da imagem filtrada a ser truncada;
- *Uhistogram\_cut* - A percentagem da parte final superior do histograma da imagem filtrada a ser truncada.

Estes parâmetros foram seleccionados por meio de experimentação, assumindo valores de 2.25, 0.05, 2, 0 e 2 respectivamente, e permitiram obter uma melhoria significativa do contraste nas zonas problemáticas. Após o processo de filtragem, foi ainda aplicada nas imagens dela resultantes, uma equalização adaptativa do histograma. O histograma representa a frequência relativa de ocorrência dos valores correspondentes aos níveis de cinzento que constituem a imagem. A sua equalização é um processo de modelação que tem como objectivo obter um histograma uniforme, de forma a alcançar um nível ótimo de contraste. Este processo revela-se especialmente útil em imagens cujo histograma apresenta uma forma estreita, resultando no seu alongamento e consequente melhoria do contraste, podendo contudo provocar uma amplificação do ruído em zonas de cor constante ou em contornos vivos. A equalização adaptativa consiste em aplicar a técnica acima descrita a cada pixel de uma imagem, baseada no histograma de uma janela local que contém os píxeis da sua vizinhança [45]. Para tal recorreu-se à função *adapthisteq.m* integrante da *Image Processing Toolbox* do Matlab. O tamanho seleccionado para a janela foi de  $15 \times 15$  e foi determinado experimentalmente. Já o *ClipLimit*, parâmetro entre 0 e 1 responsável por limitar a melhoria de contraste, tomou o valor de 0.005.

Em último lugar, de forma a amenizar os efeitos do ruído produzidos pela equalização, foi aplicado um filtro de *Wiener*, recorrendo à função *wiener2*, e utilizando uma janela de dimensões  $3 \times 3$ . Na Fig. 3.19 é possível observar um exemplo das imagens resultantes da sucessão das várias técnicas aplicadas no tratamento de imagens.

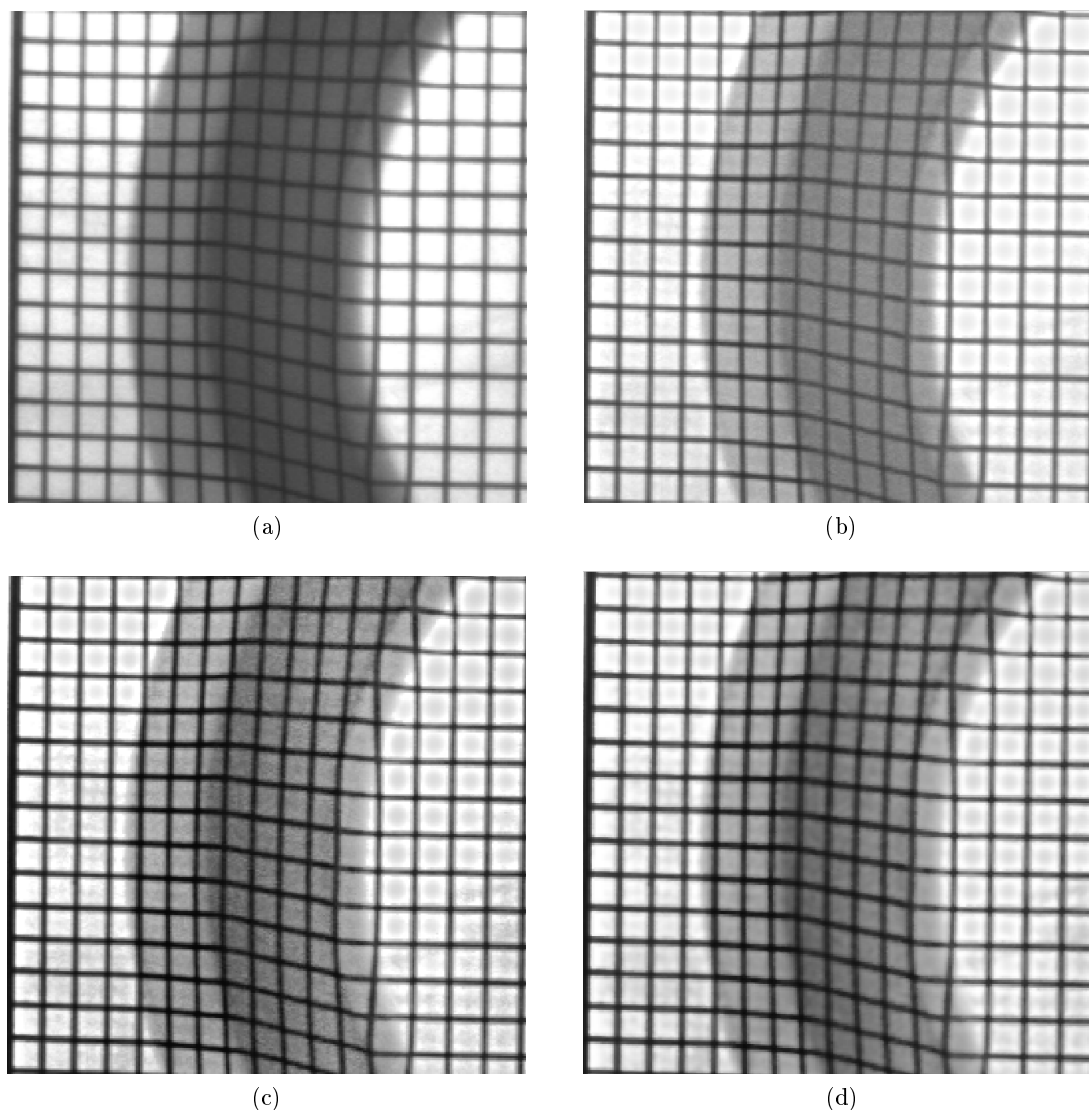


Figura 3.19: Pre-processamento de imagens com vista a melhoria do contraste. Imagem original (a), imagem resultante da filtragem homomórfica (b), imagem resultante da equalização adaptativa do histograma (c) e imagem resultante do processo de filtragem do ruído (d).

### 3.5.4 Binarização

A binarização é uma técnica bastante frequente em diversas aplicações gráficas e de visão artificial. O seu objectivo é classificar os píxeis de uma imagem como claros ou escuros. Assim uma imagem constituída pelos típicos 255 níveis de cinzento, passa a possuir apenas dois tipos de valores, 0 correspondente às zonas negras, e 1 correspondente às zonas brancas. As técnicas mais comuns de binarização consistem em escolher um valor limite entre 0 e 255 e classificar cada pixel da imagem como 0 ou 1 com base nesse limite estabelecido, consoante os seus valores se encontrem acima ou abaixo do mesmo. Contudo, a existência de um único limite fixo para toda a imagem, também chamado

de *threshold*, não costuma proporcionar bons resultados no caso de existirem variações espaciais da iluminação na imagem, ou variações temporais quando se trata de um vídeo.

A solução mais frequente para lidar com este tipo de condições é recorrer ao uso de técnicas de binarização adaptativa [46]. Estas, ao invés de usarem o mesmo limite de binarização para toda a imagem, atribuem um limite a cada pixel, baseado nos níveis de cinzento da sua vizinhança, revelando-se assim mais robustas a alterações da iluminação.

A técnica de binarização adaptativa utilizada é apelidada de *Adaptive Thresholding Using the Integral Image* [46], e a sua implementação em Matlab é de uso livre e encontra-se disponível em [47]. O princípio por detrás do seu funcionamento é relativamente simples. Resumidamente, é calculado o valor da média das intensidades de uma região vizinha de  $s \times s$ , e de seguida este é comparado ao valor do pixel em análise. Se o valor do pixel é  $t$  por cento inferior à média calculada, então é colocado a preto, caso contrário é colocado a branco.

A dimensão da janela  $s \times s$  e o valor de percentagem  $t$  são assim os únicos parâmetros de entrada da função *bradley.m* utilizada, para além da imagem a binarizar. Estes foram seleccionados experimentalmente e no caso das dimensões da janela tomaram um valor constante de  $15 \times 15$  para todos os 18 pares de imagens. Já o valor  $t$  foi seleccionado consoante o par de imagens em questão, de forma a obter uma binarização que permitisse a melhor visualização possível do padrão marcado, sem no entanto ser baixo ao ponto de causar um significativo aparecimento de ruído indesejado, e apresentando valores típicos entre 10 e 25.

Na Fig. 3.20 é possível visualizar os resultados obtidos empregando uma técnica de binarização baseada no método de Otsu (a) e os resultados obtidos com a técnica de binarização adaptativa acima referida (b), isto para uma imagem de um provete com forma esférica marcado com um padrão de quadriculas, e previamente submetida ao estágio de pré-processamento.

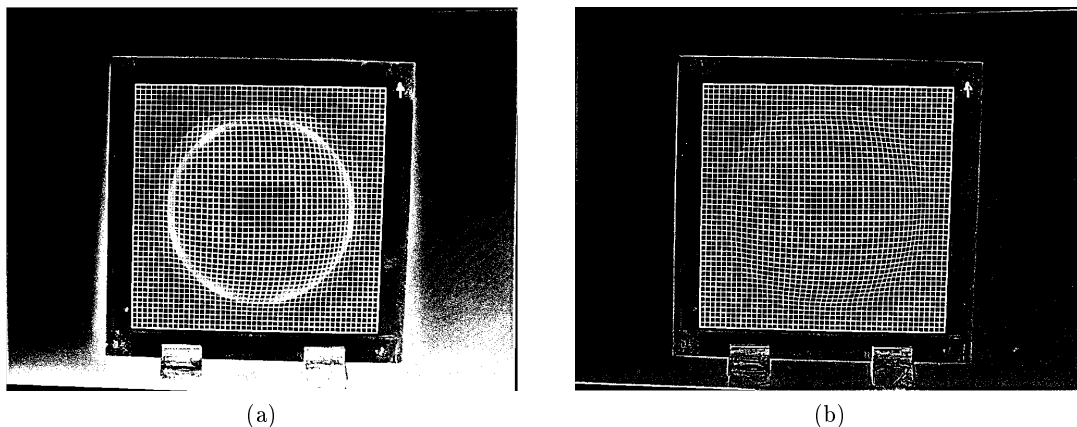


Figura 3.20: Duas técnicas de binarização aplicadas a uma imagem de um provete de forma esférica, marcado com um padrão quadriculado, e após o tratamento de pré-processamento. Na imagem (a) observa-se o resultado da aplicação do método de Otsu. Já na imagem (b) é possível observar o resultado da aplicação do método de binarização adaptativa de Bradley.

Observam-se claramente os efeitos negativos causados pela iluminação desigual na

imagem resultante da aplicação do método de Otsu, que se traduzem no aparecimento de uma auréola branca na zona de transição entre a parte plana e a parte esférica do provete, correspondente à zona mais escura. É de referir que ambas as imagens foram invertidas para facilitar o posterior processamento.

### 3.5.5 Seleção e Cálculo das Coordenadas 2D

Para conseguir obter uma nuvem de pontos 3D representativa da superfície marcada, é primeiro necessário extrair um conjunto de coordenadas bidimensionais das duas imagens, para posteriormente proceder à sua correspondência e por fim efetuar a triangulação. Foram criadas duas rotinas diferentes em Matlab para processar os dois tipos de padrões. Estas baseiam-se no processamento de determinadas características e aspectos geométricos presentes nas imagens binarizadas. Em ambos os casos é necessário proceder à seleção manual de uma região de interesse, contendo a porção da imagem onde está incluído o padrão a analisar. Na Fig.3.21 é possível observar a seleção de uma região de interesse, bem como a imagem resultante, após eliminação do ruído.

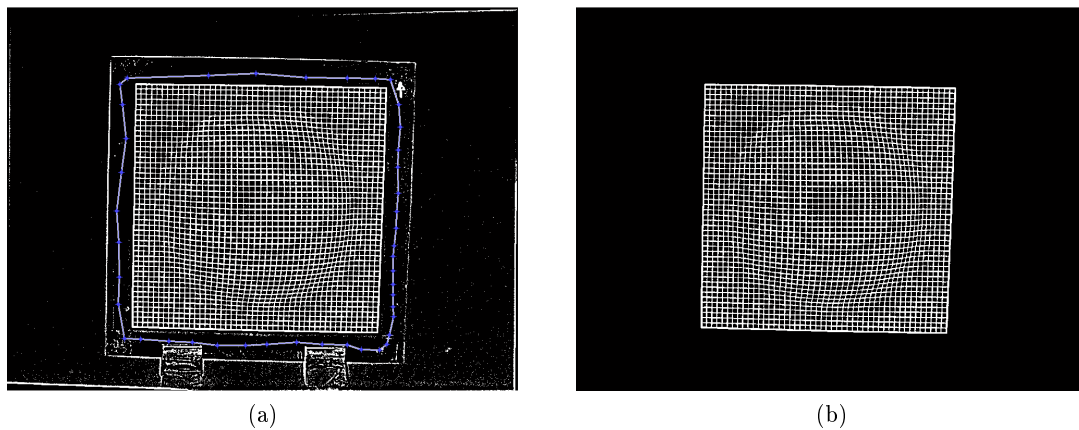


Figura 3.21: Seleção manual de uma região de interesse contendo todo o padrão a analisar (a) e imagem resultante após eliminado o ruído (b).

### Processamento do Padrão Quadriculado

Após a seleção da região de interesse acima referida, obteve-se a porção da imagem nela contida. Esta contém píxeis e ruído que não correspondem ao padrão marcado, fruto do processo de binarização adaptativa. No caso do padrão quadriculado este é facilmente eliminado com base na área, recorrendo à função *bwareaopen*, integrante da *Image Processing Toolbox*, já que a grelha constitui um objecto de grandes dimensões quando comparada com o possível ruído captado pela região de interesse. Foi utilizado o valor de 1000 como representante da área mínima em píxeis de um objeto para que este não seja eliminado, embora este valor possa ser alterado.

O objetivo final do processamento deste tipo de padrão foi a obtenção das coordenadas correspondentes à interseção dos segmentos que constituem as várias quadrículas. Para tal, foi usada uma metodologia levemente baseada na aplicada por Spence [21], mas com diferenças substanciais. Spence usa a informação contida nos padrões para efetuar

um processo ao qual chama *Parabolic Construction and Intersection*, no qual parábolas são usadas para obter as coordenadas das interseções com precisão sub-pixel. Neste caso, pensou-se em usar os vários segmentos do padrão para definir um conjunto de polinómios, e depois proceder ao cálculo matemático das várias interseções dos mesmos. Uma vez que na imagem são visíveis bastantes segmentos verticais ou aproximadamente verticais, e pelo facto de não ser possível definir estes tipos de segmentos através de um polinómio, foi primeiramente realizada uma pequena rotação de cada uma das imagens pertencentes a cada par, em torno do seu centro, e com uma amplitude de  $20^\circ$ , mas preservando as dimensões originais das imagens. Antes e depois desta operação foram também realizadas pequenas operações morfológicas de *Close*, ou dilatações seguidas de erosões, para restaurar possíveis pequenas quebras existentes nos segmentos. Após a rotação, aplicou-se uma técnica de esqueletização denominada *Thinning*, recorrendo à função *bwmorph* da *Image Processing Toolbox*, fazendo com que todos os segmentos ficassem assim reduzidos à espessura de um pixel. Na Fig. 3.22 (a) observa-se o resultado da rotação, e na Fig. 3.22 (b) é visível o resultado da operação de *Thinning* numa secção da Fig. 3.22 (a).

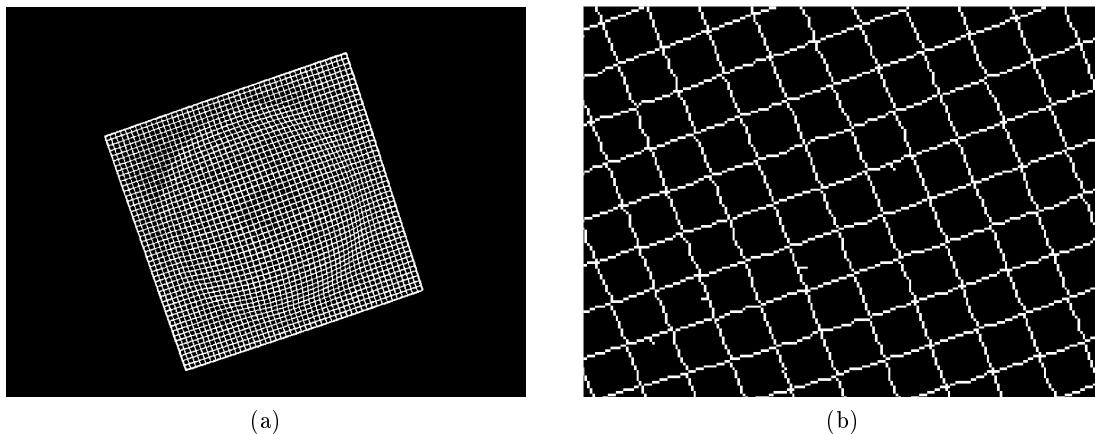


Figura 3.22: Em (a) é visível o resultado da operação de rotação em torno do centro da imagem e em (b) pode-se observar uma secção da Fig. 3.22 (a) após o processo de *Thinning*.

A operação de *Thinning* resulta na produção de alguns segmentos indesejados que ramificam dos segmentos principais. Estes podem-se dever à presença de pequenas protuberâncias existentes na grelha binarizada, ou mesmo a pequenas marcas no provete, presentes na imagem original. Foi por isso necessário executar um conjunto de operações para proceder à sua eliminação. Para tal foram localizadas as coordenadas dos pontos de ramificação, pontos onde convergem 3 ou mais segmentos, através da opção *branchpoints* da função *bwmorph*, e foram também localizados os pontos terminais dos segmentos que se pretendem eliminar, através da opção *endpoints* da função acima referida. Na Fig. 3.23 (a) é visível uma imagem com a posição dos pontos terminais marcada a vermelho, e com os pontos de ramificação marcados a verde. É ainda visível na Fig. 3.23 (b) o pormenor dos segmentos indesejados formados durante a operação de *Thinning*.

Para eliminar estes segmentos recorreu-se a um tipo de distância especial, a distância geodésica, representada em Matlab pela função *bwdistgeodesic*, também ela integrante

da *Image Processing Toolbox*. Esta é frequentemente usada para calcular a distância mais curta entre dois pontos de uma imagem binarizada, através do uso de uma máscara que limita as zonas da imagem que podem ser percorridas no cálculo dessa distância. Esta função pode ser usada para calcular a distância entre um conjunto de píxeis, dos quais são fornecidas as coordenadas em termos de colunas e linhas, e os restantes píxeis contidos na máscara, sendo que neste caso a máscara usada é a própria grelha obtida com o processo de *Thinning* e as coordenadas fornecidas são as dos pontos terminais.

Assim, para cada ponto terminal, usou-se esta técnica para calcular a distância geodésica ao ponto de ramificação mais próximo, e eliminaram-se todos os píxeis que se encontravam a uma distância inferior a essa. O segmento só é eliminado caso o seu comprimento se verifique inferior a um determinado valor, valor esse correspondente a uma percentagem do tamanho médio dos segmentos presentes na imagem, neste caso definida como 50%. Isto porque se considerou que caso um segmento contendo um ponto terminal ultrapassasse um certo comprimento, então seria muito provavelmente um segmento constituinte do padrão marcado, interrompido devido ao fraco contraste localizado ou a qualquer outra razão.

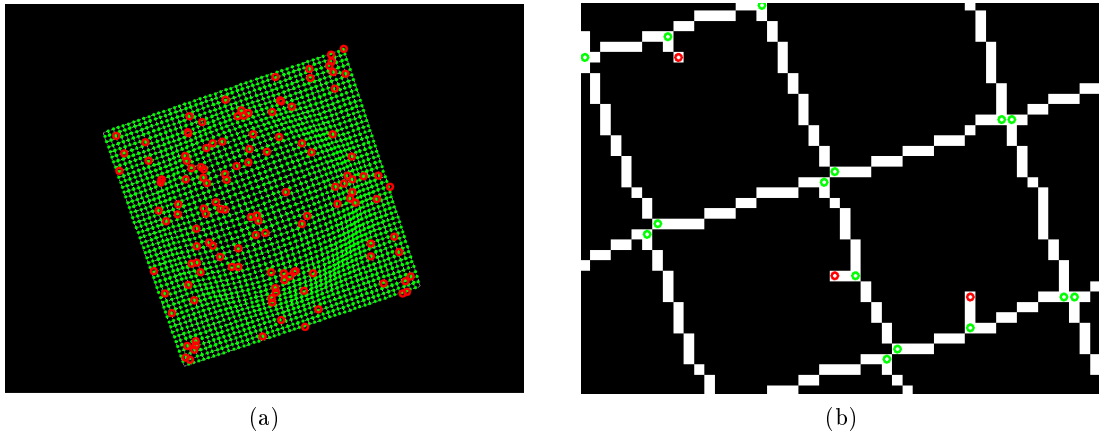


Figura 3.23: Distribuição da localização dos pontos de ramificação (a verde) e pontos terminais (a vermelho) por todo o padrão (a). Pormenor das ramificações indesejáveis existentes em alguns dos segmentos (b).

Para calcular o valor do comprimento médio dos segmentos, utilizado no processo de eliminação das ramificações, optou-se pela aplicação de um filtro digital na imagem resultante do processo de *Thinning*, recorrendo à função *filter2*, e usando uma matriz de uns como filtro bidimensional. Uma vez que as zonas da grelha onde ocorrem interseções possuem mais píxeis por unidade de área, estas zonas foram facilmente extraídas do resultado da filtragem. Obteve-se assim uma imagem em que os objetos representam as zonas onde ocorre uma interseção. Foi calculada a área média dos referidos objetos, e aqueles com área mais do que 30% superior ou inferior ao valor médio foram descartados, resultando no que se pode observar na Fig. 3.24 (a).

De seguida calcularam-se os centroides dos objetos restantes, que como se pode visualizar na Fig. 3.24 (b), se encontram aproximadamente nas zonas de interseção. O comprimento médio dos segmentos de cada imagem foi por fim calculado tendo em conta a média das distâncias de cada um dos centroides, aos respetivos dois centroides mais



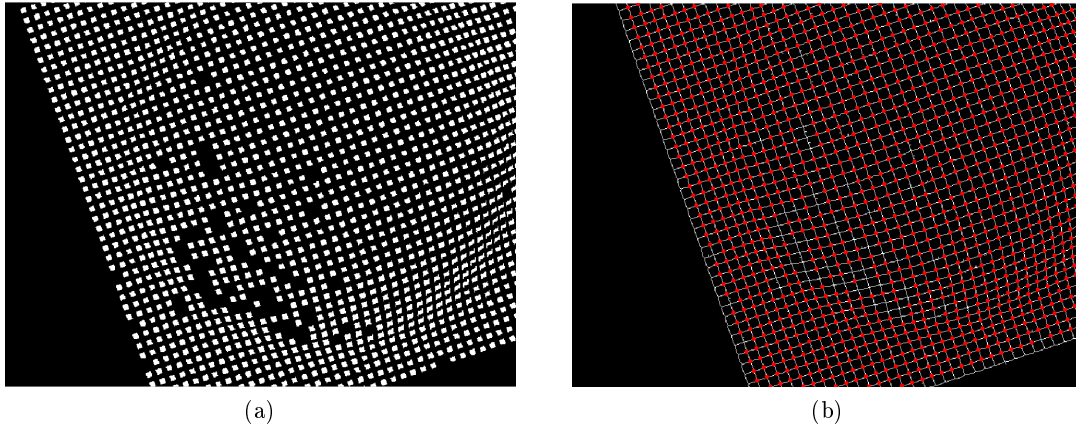


Figura 3.24: Resultado da filtragem digital e da eliminação de objetos considerados muito grandes ou muito pequenos (a). Centroides dos objetos, aproximadamente coincidentes com as zonas de intersecção (b).

próximos. As coordenadas destes centroides apenas foram utilizadas para obter uma estimativa do comprimento médio dos segmentos presentes na imagem, não tendo sido mais utilizadas posteriormente.

Depois da eliminação dos segmentos indesejados, as coordenadas dos pontos de ramificação restantes correspondem à localização aproximada de cada uma das intersecções. No entanto, e como se pode observar na Fig. 3.23 (b), em algumas das zonas de intersecção é possível encontrar dois pontos de ramificação, devido a aspetos que se prendem com a geometria da esqueletização da grelha nesses locais. Assim, para os casos em que dois pontos de ramificação se encontram a uma distância inferior a um determinado valor, é calculada a média das suas posições, e os valores obtidos constituem as coordenadas aproximadas da zona de intersecção em questão (Fig. 3.25 (a)).

Posteriormente, estas coordenadas aproximadas são utilizadas para interromper a grelha, obtendo-se assim um padrão constituído por múltiplos segmentos individuais (Fig. 3.25 (b)), e é esta a imagem posteriormente utilizada no processo de determinação das coordenadas por meio da intersecção de polinómios. A cada um destes segmentos é atribuída uma identidade e são agrupados em conjuntos de 4, sendo que a cada ponto de intersecção aproximada corresponde um conjunto contendo os segmentos da sua vizinhança, à excepção dos pontos que se encontram nas extremidades da grelha, e que apenas possuem em seu redor 3 segmentos individuais, ou de eventuais pontos do interior da grelha que não possuam 4 segmentos em seu redor.

Para determinar as coordenadas das intersecções com maior precisão elaborou-se uma função para processar cada um dos conjuntos de 4 segmentos. Esta permite seleccionar uma série de parâmetros, como por exemplo o número de segmentos ao qual se deseja aplicar cada um dos dois polinómios, podendo este assumir um número par entre 2 e 12, sendo que quantos mais segmentos se usarem no cálculo das intersecções, maior o tempo de processamento. É também possível seleccionar o grau dos polinómios a aplicar. Se durante o processamento de uma determinada intersecção, o grau escolhido não se revelar adequado, é aplicado um polinómio de grau superior ou inferior, e é repetido o cálculo. Neste trabalho foram calculadas as intersecções utilizando 12 segmentos para definir cada

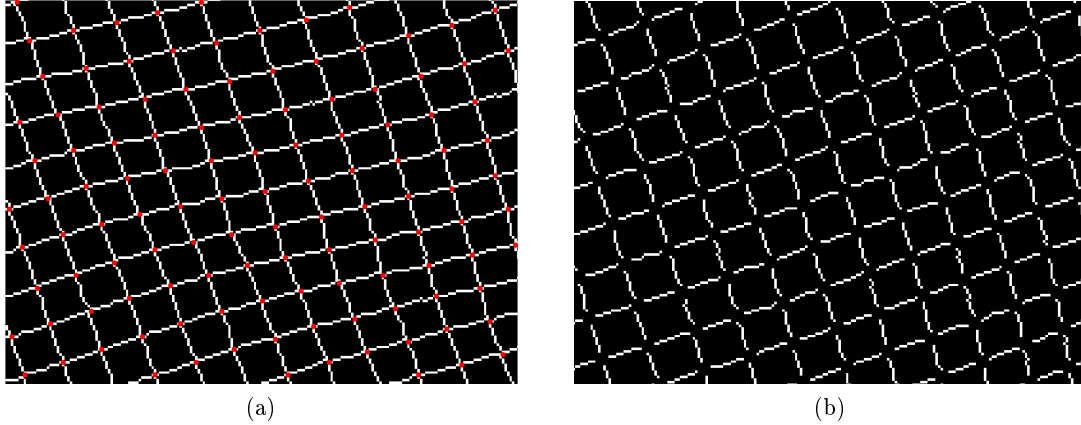


Figura 3.25: Ampliação de uma imagem onde é visível a localização aproximada dos pontos de intersecção (a) e imagem ampliada onde são visíveis os múltiplos segmentos individuais, resultante do processo de interrupção da grelha nas zonas de intersecção (b).

um dos polinómios, cujo grau escolhido foi 6. Além disso, cada uma das coordenadas calculadas é comparada à coordenada aproximada de intersecção correspondente, e apenas é validada caso se encontre a uma distância inferior a um valor máximo pré-definido.

Para definir os dois polinómios é necessário fazer uma seleção dos segmentos a usar. Inicialmente é calculada a orientação de cada um dos 4 segmentos de cada conjunto, e estes são divididos em 2 grupos, cada um contendo aqueles que possuem orientação semelhante. Após esta divisão, são calculados os pontos terminais dos segmentos, e destes são selecionados aqueles que se encontram mais afastados do ponto de intersecção. É na proximidade de cada um destes 4 pontos terminais que são encontrados os 3 segmentos da próxima intersecção, e destes é selecionado aquele cuja orientação mais se assemelha à orientação do segmento ao qual pertence o ponto terminal em causa. Este processo é repetido de acordo com o número de segmentos a usar, inicialmente definido. Caso não sejam encontrados segmentos na vizinhança de um dos pontos terminais, o processo de busca dos segmentos que se encontram nessa direção é terminado, e são usados apenas aqueles que foram selecionados até então (Fig. 3.26 (b)).

Terminada a seleção dos objetos relevantes, são determinadas as coordenadas de todos os píxeis que os constituem e é definida a curva polinomial que os descreve mais adequadamente, de acordo com o método dos mínimos quadrados, e recorrendo para isso ao uso da função *polyfit*. Por fim, tendo os dois polinómios, facilmente se calcula a sua intersecção usando a função *fzero*. Na Fig. 3.26 (a) são visíveis os acima referidos pontos terminais a azul, bem como os polinómios definidos a vermelho, e o ponto resultante da sua intersecção a amarelo.

A possibilidade de selecionar o número de segmentos a utilizar para definir cada polinómio revela-se útil pois permite que este seja escolhido adequadamente consoante o comprimento em píxeis dos segmentos presentes na imagem. Quanto menor este comprimento maior deve ser o número de segmentos a utilizar para calcular adequadamente a intersecção, já que cada um deles contém menos informação. Por outro lado, se estes possuírem maiores dimensões, vão conter mais informação, podendo por isso escolher-se um menor número de segmentos para proceder à determinação das intersecções.

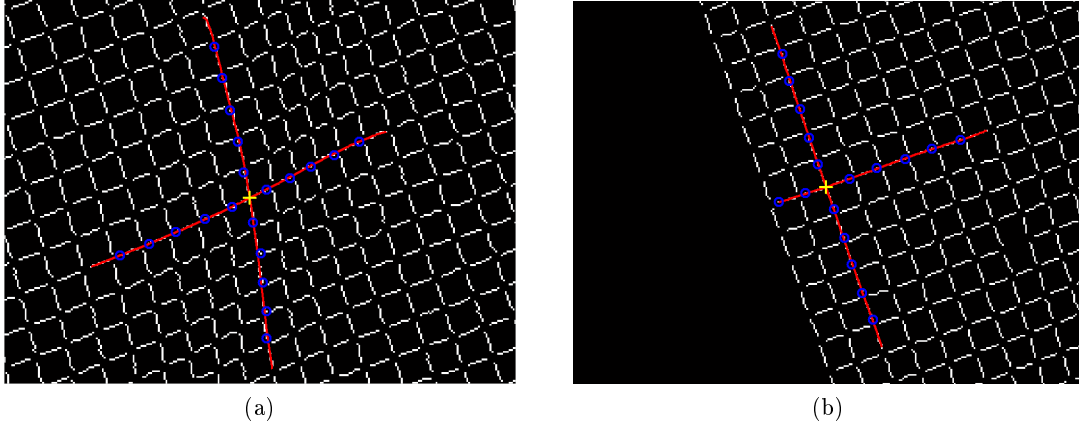


Figura 3.26: Determinação das coordenadas através do cálculo de intersecções polinomiais, utilizando 12 segmentos por polinómio. Representação de uma intersecção na zona interior do padrão (a), e representação de uma intersecção próxima das margens do padrão (b).

Uma vez que as coordenadas foram determinadas em imagens que sofreram uma rotação, é necessário aplicar-lhes uma transformação, de modo a que estas representem as posições onde ocorrem as intersecções nas imagens originais. Sabendo as dimensões da imagem, e o ângulo da rotação que sofreram, é possível exprimir da seguinte forma a transformação a aplicar a qualquer um dos pontos determinados:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & tx \\ 0 & 1 & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -tx \\ 0 & 1 & -ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

ou, em notação matricial:

$$P_f = T_2 \times \mathbf{R} \times T_1 \times P_0. \quad (3.8)$$

A transformação de qualquer ponto  $P_0$  de coordenadas  $(X_0, Y_0)$  para a sua posição final  $P_f$  de coordenadas  $(X_f, Y_f)$  consiste na aplicação de uma translação inicial  $T_1$ , com valores de  $-tx$  e  $-ty$ , de forma a que a origem do referencial localizado no centro da imagem, e segunndo o qual foi realizada a rotação das imagens, seja translacionada para a origem do referencial atual, ou seja o canto superior esquerdo da imagem. Os valores de  $tx$  e  $ty$  correspondem assim às coordenadas do centro da imagem, e foram obtidos dividindo em dois o número de colunas e o número de linhas da imagem respetivamente. Assim, para uma imagem com resolução de  $1600 \times 1200$ , utilizou-se um  $tx$  de 800 e um  $ty$  de 600.

Após esta translação é efetuada uma rotação  $\mathbf{R}$ . A rotação inicial da imagem, com magnitude de  $20^\circ$ , foi executada recorrendo à função *imrotate*, que aplica uma rotação no sentido contrário aos ponteiros do relógio para ângulos de valor positivo. Assim, dado que o referencial imagem possui um eixo  $x$  horizontal, positivo da esquerda para a direita, e um eixo  $y$  vertical, positivo de cima para baixo, o seu eixo  $z$  aponta obrigatoriamente

para o interior da imagem, e como tal, o valor de  $\alpha$  a usar na matriz de rotação  $\mathbf{R}$  é também ele de  $20^\circ$ , com sinal positivo, ao contrário do que se poderia pensar.

Por fim aplicou-se uma nova translação  $T_2$  com valores de  $tx$  e  $ty$ , de forma a transportar as coordenadas calculadas, de volta ao referencial original.

Este conjunto de 3 transformações foi aplicado a todas as coordenadas determinadas pelo método de intersecção polinomial. Para efeitos de comparação foi também aplicado às coordenadas aproximadas de intersecção determinadas através dos pontos de ramificação. Na Fig. 3.27 (a) é possível observar as coordenadas calculadas após a transformação de referencial numa das imagens retificadas de um par estéreo. Já na Fig. 3.27 (b) é possível observar a diferença entre a posição das coordenadas calculadas pelo método de intersecção polinomial (a vermelho) e as coordenadas de intersecção aproximadas (a verde) numa secção ampliada da imagem Fig. 3.27 (a).

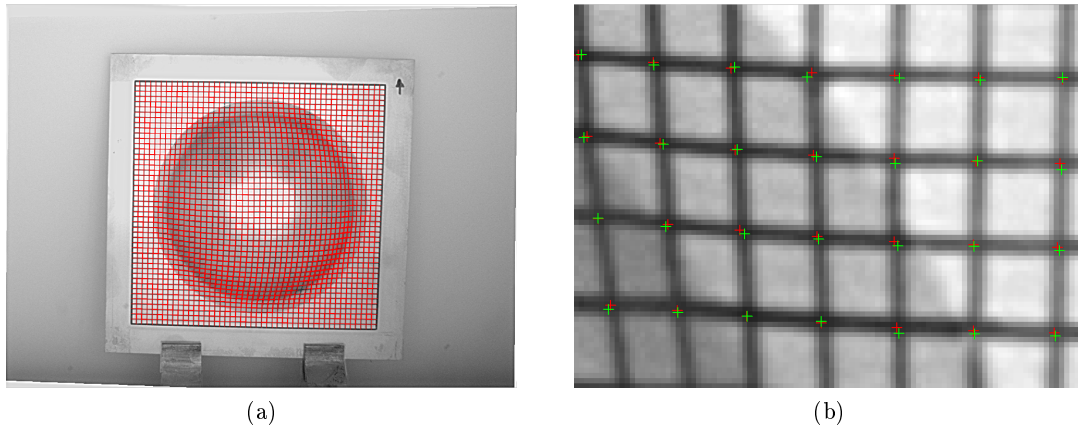


Figura 3.27: Posição final das coordenadas das intersecções determinadas pelo método de intersecção polinomial numa das imagens retificadas de um par estéreo (a) e ampliação de uma zona da imagem, onde é visível a diferença entre as coordenadas calculadas pelo referido método (a vermelho) e as coordenadas aproximadas de intersecção, resultantes das coordenadas dos pontos de ramificação (a verde) (b).

De todo este processo resultam duas matrizes contendo as coordenadas dos pontos de intersecção relativos a cada uma das imagens. No que diz respeito ao tempo de processamento, a metodologia elaborada, para processar este tipo de padrão até obter as coordenadas de intersecção finais, revela-se bastante lenta, especialmente se forem usados bastantes segmentos para definir os polinómios. No entanto, como não se pretende uma aplicação em tempo real, este fator não representa um problema. Além disso, é um método que apresenta uma certa robustez ao eventual ruído introduzido durante o processo de binarização, já que posteriormente este é facilmente separado da binarização da grelha que constitui o padrão.

### Processamento do Padrão de Pontos

O processamento do padrão de pontos revela-se bastante mais rápido e menos complexo. Tal como no caso anterior, é seleccionada uma região de interesse contendo todos os pontos constituintes do padrão marcado. Esta região tende contudo a possuir algum

ruído, que em termos de forma e dimensões, nem sempre é facilmente distinguível dos pontos marcados. Foi por isso definido um conjunto de estratégias para proceder à sua eliminação.

A primeira tem por base a eliminação de objetos com uma área em píxeis inferior a um determinado limite, isto porque o ruído nas zonas da imagem correspondentes a arestas vivas no provete é frequentemente composto por objetos de dimensões reduzidas, tais como os observáveis na Fig. 3.28 (a). Assim, no presente caso, a área mínima considerada para que um objeto fosse validado foi de 8 píxeis.

A segunda tem em conta a geometria dos objetos, mais concretamente a sua circularidade. Esta depende do perímetro e da área do objeto, e pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.9)$$

A circularidade resulta em valores próximos de 1 para objetos de forma circular, e assume valores crescentes quanto menos circular for a forma do objeto analisado. Este parâmetro é regulável, e para as imagens analisadas tomou o valor limite de 2, a partir do qual o objeto é eliminado.

A terceira e última estratégia baseia-se no espaçamento médio entre os pontos marcados na imagem. Para cada um dos objetos na imagem, foram localizados os 40 objetos mais próximos, que constituem a sua vizinhança. Por sua vez, para cada um destes, foi obtida a distância aos dois mais próximos e calculada a sua média, existindo assim um vetor de 40 valores relativos aos respetivos 40 objetos. Por fim foi calculada uma média dos valores constituintes deste vetor, obtendo assim um valor que se considerou como sendo o representativo do espaçamento médio entre pontos na vizinhança do objeto em análise. Assim, para cada objeto, foram também calculadas as distâncias aos dois pontos mais próximos, e igualmente efetuada a sua média. Caso esta média seja inferior a 70% do valor correspondente ao espaçamento médio entre pontos na sua vizinhança, então o objeto é considerado como ruído e é eliminado.

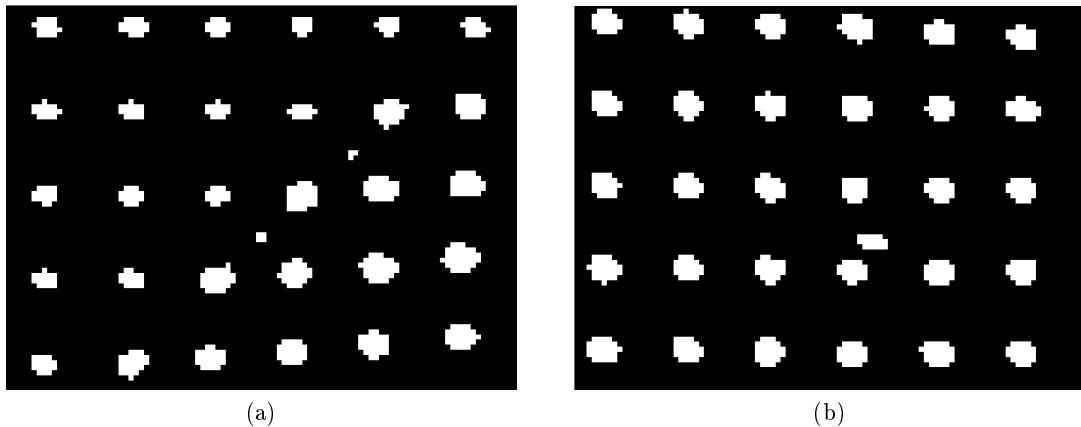


Figura 3.28: Padrão binarizado contendo ruído. A imagem (a) representa algum ruído proveniente da binarização de arestas vivas de um provete. A imagem (b) representa um objeto resultante de sujidade presente no provete .

Este método revelou-se eficiente pois, como se pode observar na Fig.3.28 (b), o ruído tende a localizar-se no espaço entre os pontos marcados e, assim, a sua distância aos objetos que o rodeiam tende a ser menor que o espaçamento médio entre os pontos da sua vizinhança. Tanto o parâmetro relativo ao tamanho da vizinhança como a percentagem mínima de semelhança podem ser alterados, tendo assumido os valores expostos no tratamento de todas as imagens contendo padrões de pontos. Na Fig. 3.29 pode-se observar uma imagem de um padrão de pontos binarizado, pertencente a um par estéreo, após ser submetido às técnicas acima referidas.

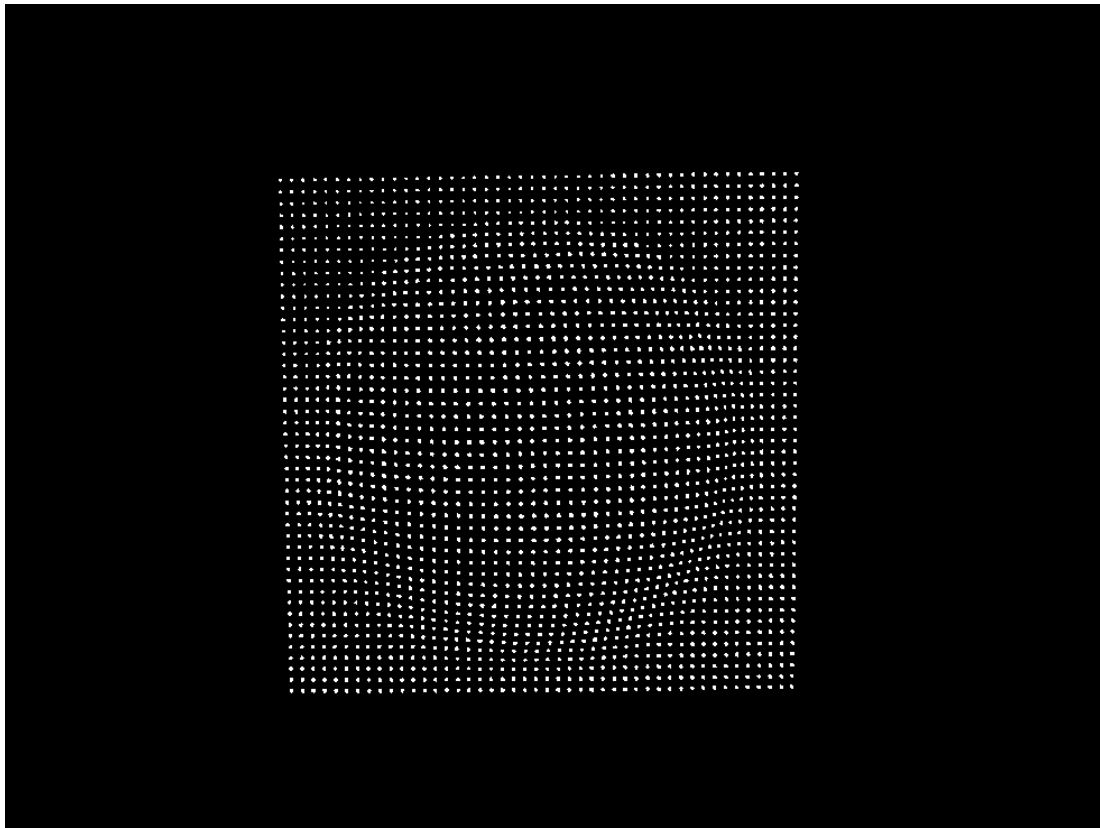


Figura 3.29: Imagem de um padrão de pontos binarizado, após remoção do ruído.

Uma vez selecionados os pontos válidos, são calculados os seus centróides recorrendo à função *regionprops*. Contudo, no caso do padrão de pontos, este cálculo das coordenadas associadas a cada um dos pontos só é feito na fase de correspondência.

### 3.5.6 Cálculo da Correspondência

#### Correspondência

A maioria dos algoritmos de correspondência estéreo podem ser divididos em duas grandes categorias: métodos locais e métodos globais.

Os métodos locais podem por sua vez ser divididos em duas outras sub-categorias: algoritmos baseados em regiões/áreas (*area based*) e algoritmos baseados em características/propriedades (*feature based*)[48]. Os primeiros fazem uso de uma pequena janela

centrada num determinado pixel, e localizada numa das imagens considerada como referência, para procurar na outra imagem a janela que lhe corresponde, através da comparação de intensidades dos píxeis presentes em ambas. Na imagem a ser analisada, a janela que possuir a menor diferença de intensidades é selecionada como a melhor candidata à correspondência. Estes permitem obter um mapa denso da disparidade, mas tendem a apresentar problemas na presença de regiões de pouca textura. Alguns dos parâmetros de custo mais frequentemente usados na comparação de janelas são por exemplo a soma das diferenças absolutas (SAD) e a soma das diferenças quadradas (SSD) [49]. Já os algoritmos baseados em características, recorrem à extração e correspondência de determinados pormenores, como por exemplo cantos ou arestas, e costumam ser bastante rápidos e precisos, originando contudo um mapa de disparidade disperso [48].

Por outro lado, na categoria dos métodos globais, estão incluídos algoritmos que se apoiam em hipóteses de variação suave da disparidade, resolvidas através de variadas técnicas de optimização, maioritariamente recorrendo à minimização de uma função de custo [48].

A maioria das técnicas recorre a uma série de condicionantes de forma a conseguir obter a correta correspondência, da forma mais eficiente possível. Seguem-se algumas das restrições mais frequentemente usadas [49].

- Restrição epipolar - Os pontos correspondentes estão contidos na mesma linha epipolar;
- Restrição da continuidade - A disparidade tende a variar lentamente ao longo de uma superfície;
- Restrição da singularidade - Um ponto de uma imagem possui no máximo um ponto correspondente na outra imagem;
- Restrição da ordenação - A ordem dos objetos ao longo das linhas epipolares é a mesma em ambas as imagens;
- Restrição da oclusão - A ocorrência de descontinuidades numa das vistas corresponde à ocorrência de oclusão na outra vista, e vice-versa.

Tendo em mente algumas destas restrições, mais especificamente a epipolar, a da singularidade e a da ordenação, desenvolveu-se uma técnica simples, baseada em operações com imagens, para efetuar a correspondência dos vários pares estéreos, recorrendo para isso à informação obtida na fase de seleção e cálculo das coordenadas 2D. De facto todas estas três restrições são aplicáveis. Uma vez que as imagens processadas foram previamente retificadas, a restrição epipolar resulta que pontos correspondentes se encontram na mesma linha de ambas as imagens. Quanto à restrição da ordenação, esta tende a verificar-se quase sempre, à excepção de imagens que apresentem objetos demasiado estreitos ou superfícies transparentes, o que não é o caso, dado que os provetes constituem superfícies opacas. Dela resulta que, se numa das imagens um dado ponto  $P_1$  se encontra à direita de um ponto  $P_2$ , o mesmo acontecerá na imagem restante.

A técnica desenvolvida é ligeiramente diferente no que toca ao processamento das imagens de provetes marcados com pontos e de provetes marcados com quadrículas. No que diz respeito ao cálculo da correspondência nas imagens de padrões de pontos, estabeleceu-se a imagem esquerda como sendo a de referência. Numa primeira fase, os

pontos nesta contidos são catalogados, recorrendo para isso à função *bwlabel* (integrante da *Image Processing Toolbox* em Matlab). Esta atribui um número diferente a cada objeto conectado de uma imagem binária. A ordem de atribuição destes números é feita coluna a coluna. Assim, os objetos que se encontram mais à esquerda na imagem são catalogados primeiramente, assim sucessivamente até estar catalogado o objeto que se encontra mais à direita. No caso de dois objetos se encontrarem na mesma coluna, é catalogado em primeiro lugar aquele que se encontrar na linha mais acima.

Após este processo, os objetos da imagem de referência são selecionados um a um, de acordo com a sua ordem de catalogação, e para cada um é calculado o seu centroide. Com as coordenadas deste é concluída a linha na qual o objeto analisado se encontra contido, e graças à restrição epipolar, é possível afirmar com certeza que o objeto da imagem direita que lhe corresponde se encontra também ele contido nessa mesma linha. Posto isto, é realizada uma operação de intersecção de duas imagens binarizadas, em que uma cópia da imagem direita, mas que contem apenas os objetos por corresponder, é intersetada com uma imagem de iguais dimensões, contendo uma simples faixa branca, posicionada na linha onde se encontra o centroide do ponto de referência. Desta intersecção resultam um conjunto de objetos que vão funcionar como sementes num processo de reconstrução, processo esse que usa como máscara a acima referida cópia. Esta reconstrução é feita recorrendo à função *imreconstruct*, e dela resulta uma imagem que contém todos os objetos da máscara que se cruzam com a faixa em questão, e que por isso são candidatos à correspondência. Por cada ponto correspondido, é removido da máscara o objecto equivalente, e a imagem resultante é usada como máscara na próxima reconstrução, referente ao par de pontos seguinte. Assim, é possível garantir que, dos pontos provenientes da reconstrução, o ponto que se encontra mais à esquerda será sempre o correto candidato à correspondência, pois todos os eventuais pontos contidos na mesma linha e à sua esquerda na imagem direita original, já foram previamente correspondidos e por isso eliminados da imagem usada como máscara. Identificado o objeto correspondente, é igualmente calculado o seu centroide. Este é portanto um processo cíclico e que se repete até todos os pares de pontos estarem devidamente correspondidos. No final do processo obtêm-se uma matriz de  $n \times 4$ , contendo para cada linha as coordenadas relativas aos centroides dos objetos correspondentes  $(xl, yl)$  e  $(xr, yr)$ , para os  $n$  pares de pontos.

Para melhor compreender o processo, pode-se observar a Fig.3.30, contendo os diversos estágios associados à correspondência de um ponto.

Para calcular a correspondência nas imagens de provetes marcados com padrões quadriculados, o processo é muito semelhante. Contudo, neste caso não existe um par de imagens binarizadas contendo um padrão de pontos individuais, pelo que as coordenadas extraídas durante o processamento deste tipo de padrões são usadas na criação de duas imagens intermédias. Estas são constituídas por um fundo negro, onde são criados pequenos objetos nas posições correspondentes ao arredondamento das coordenadas de intersecção calculadas em 3.5.5, resultando assim em duas imagens semelhantes a dois padrões de pontos. Estas são por sua vez processadas usando a mesma técnica, contudo, após a correspondência de cada par de objetos, são selecionadas as coordenadas que lhes deram origem, calculadas pelo método de intersecção polinomial, e são descartadas as coordenadas dos centroides calculadas durante o processo de correspondência.

Obviamente este processo só permite o correto cálculo da correspondência caso cada um dos objetos presentes na imagem esquerda possuam um objeto correspondente na



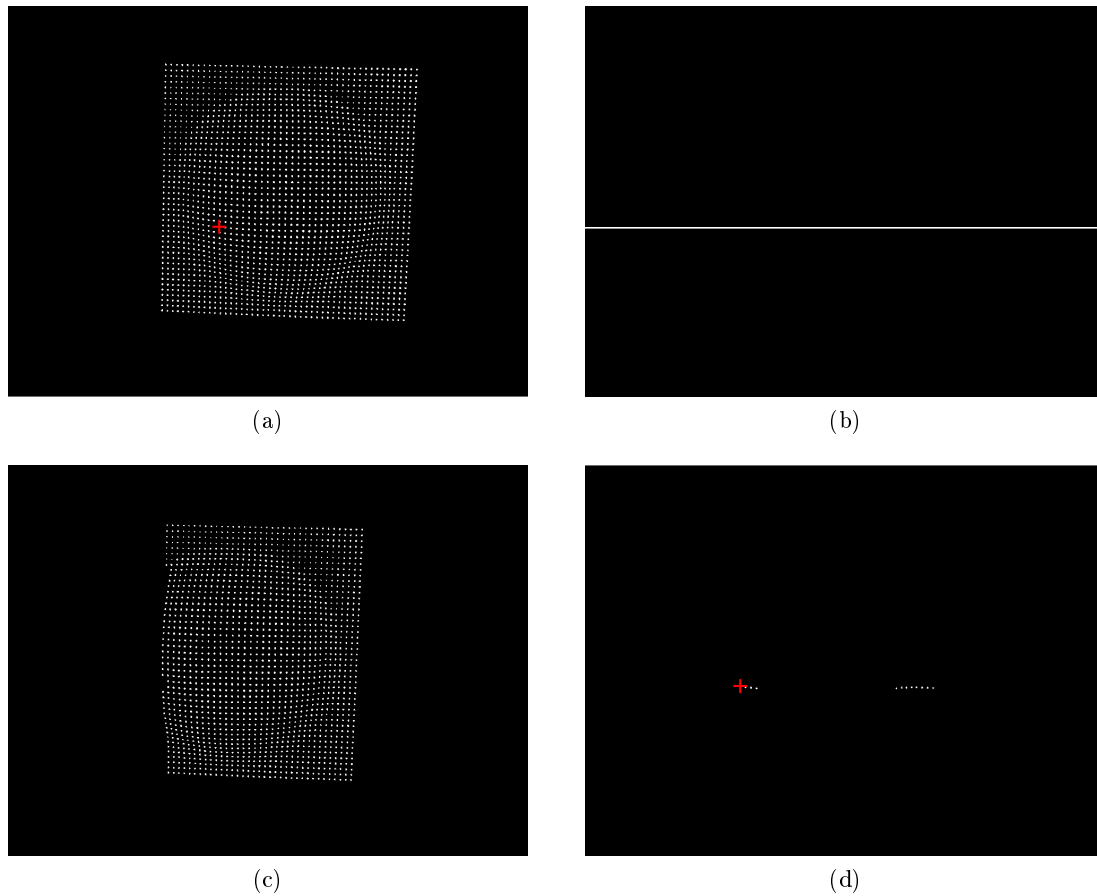


Figura 3.30: Na imagem (a) é visível a vermelho a localização do objecto da imagem esquerda catalogado com o número 500. Em (b) é possível ver a imagem contendo a faixa branca, posicionada de acordo com a ordenada do centroide relativo ao objeto identificado em (a). Em (c) observa-se a imagem usada como máscara no processo de reconstrução, contendo apenas os pontos da imagem direita por corresponder, e com a qual é intersectada a imagem (b). Finalmente em (d) observam-se os pontos reconstruídos, candidatos à correspondência, em que o ponto mais à esquerda, marcado a vermelho, representa a correta correspondência.

imagem direita. O que em certos casos não acontece, existindo por vezes pontos ou zonas de intersecção em falta, numa ou em ambas as imagens, resultantes de manchas na superfície do provete, ruído, ou de uma má binarização localizada. Para solucionar este problema, e permitir o uso desta técnica nesses casos, foi desenvolvida uma metodologia para estimar a localização e proceder à reconstrução de objetos em falta.

### Reconstrução de Pontos em Falta

Para possibilitar o uso da referida técnica de correspondência, e prever as coordenadas de possíveis pontos em falta, desenvolveu-se um método de processamento e combinação de imagens obtidas por meio de operações morfológicas. Tanto no caso do padrão de pontos, como no do padrão quadriculado, usaram-se imagens contendo pequenos objetos

situados respectivamente nas coordenadas obtidas com o cálculo dos centroides e com o cálculo polinomial das intersecções. Estas são apelidadas de imagens base, nas quais é aplicada a metodologia que se segue. Esta metodologia divide-se em duas fases: uma primeira de deteção e reconstrução de pontos em falta na zona fronteiriça do padrão, e uma segunda em que são reconstruídos os pontos em falta no interior do padrão.

Inicialmente é feita uma operação dilatação seguida de erosão, de modo a aglomerar todos os objetos do padrão, numa única zona quadrada (Fig. 3.31(a)). De seguida são obtidas as arestas dessa zona, que constituem as fronteiras da zona quadrada obtida. Estas são por sua vez submetidas a uma dilatação (Fig. 3.31(b)), e a imagem resultante é interceptada com a imagem inicial contendo os múltiplos objetos.

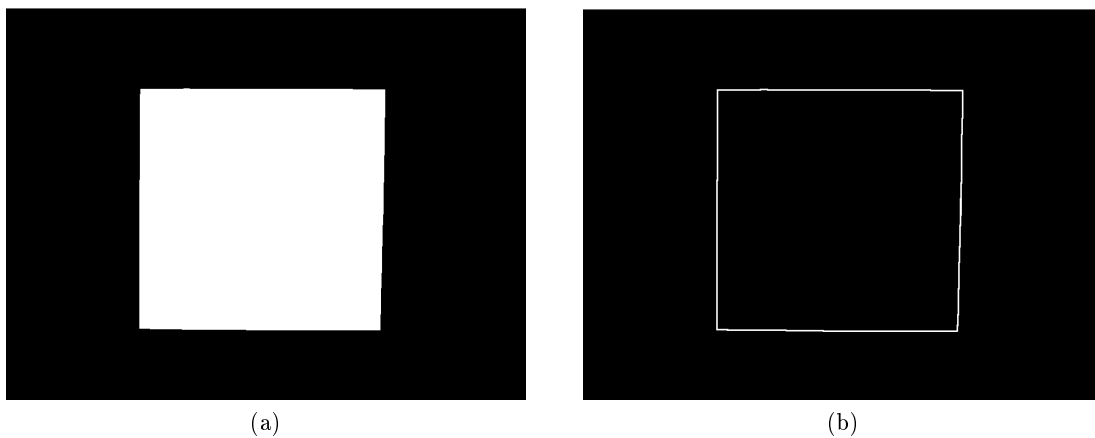


Figura 3.31: Objeto resultante da dilatação de cada um dos objetos do padrão (a) bem como as suas arestas após dilatação (b).

Com os objetos resultantes desta intercepção obtêm-se facilmente os pontos presentes na periferia do padrão (Fig. 3.32(a)). São identificados os seus centroides, e para cada um deles, é calculada a distância ao elemento mais próximo, permitindo assim obter uma média do espaçamento entre eles. Por fim, é utilizado o centroide do objeto situado mais à esquerda na imagem, para começar um processo cíclico, em que inicialmente é localizado o centroide do objeto que lhe é mais próximo, e calculada a distância que os separa. De seguida é descartado o primeiro centroide, e o processo repete-se para este último, e assim sucessivamente até não restarem mais. Para cada um destes casos, é comparada a distância ao ponto mais próximo, com a média obtida, e se o seu valor for mais do que 50 % superior a esta, é determinado um ponto intermédio, cuja posição resulta da média das coordenadas dos centroides do par de objetos em questão (Fig. 3.32(b)).

Este é portanto um processo cíclico que toma o sentido dos ponteiros do relógio, ou o sentido contrário, e percorre todos os pontos da fronteira do padrão, recriando assim os objetos em falta. Isto é possível pois os pontos pertencentes à fronteira não sofrem deformação, sendo que a distância entre eles tende a ser bastante regular, pelo que uma distância entre pontos que se afaste muito do esperado é obrigatoriamente sinónimo da ausência de um ponto.

Identificada a possível ausência de pontos fronteiriços, e feita a previsão das suas localizações, são criados os objetos em falta nas respetivas posições das imagens base.

Segue-se a fase de identificação e previsão das localizações de pontos em falta no

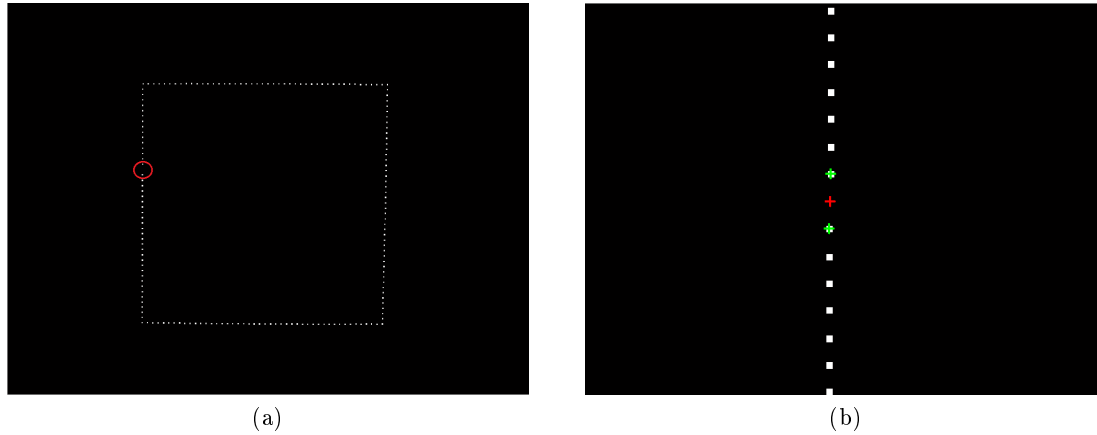


Figura 3.32: Pontos fronteiricos, com um ponto em falta na região demarcada a vermelho (a) e ampliação da região, com a posição prevista do ponto em falta a vermelho, e com as coordenadas dos centroides dos objetos usados na sua determinação marcadas a verde (b).

interior do padrão. Nesta, usam-se inicialmente as imagens das arestas dilatadas 3.31 (b) para obter a orientação do padrão na imagem. Para isso recorre-se à transformada de Hough para identificar os segmentos de recta relativos às 4 arestas, e assume-se que a orientação do padrão é definida pelo segmento de recta com uma orientação de módulo menor. De seguida, é feita uma dilatação de todos os objetos constituintes de ambas as imagens base (incluindo os objetos das fronteiras reconstruídos) recorrendo a elementos estruturantes lineares com duas orientações distintas, a orientação do padrão e uma segunda perpendicular a esta. Esta dilatação é feita de modo a que cada um dos objetos se funda com os objetos vizinhos numa determinada direção, definida pelas acima referidas orientações, resultando assim em dois padrões de faixas. Assim, de cada uma das imagens base, resultam duas imagens contendo padrões de faixas, cada uma delas obtida através de dilatações lineares com orientações distintas. Estas faixas vão-se encontrar interrompidas nas zonas onde existem objetos em falta. Eventualmente podem existir outras zonas onde as faixas se encontrem interrompidas, nos casos em que a dilatação aplicada não foi suficiente para fundir os objetos nesse local, mas como se verá mais à frente isso não levanta qualquer problema. Na Fig. 3.33 é possível observar os dois padrões de faixas associados a uma das imagens base, com as zonas onde ocorrem interrupções assinaladas a vermelho.

Todas as 4 imagens contendo faixas são submetidas a uma esqueletização, e são de seguida determinados os pontos terminais de todos os objetos (Fig.3.34). Estes pontos situam-se nas zonas de fronteira do padrão, bem como nas zonas onde as faixas se encontram interrompidas. Os pontos terminais relativos às zonas de fronteira são descartados, e os restantes são divididos em dois grupos, com base nas suas posições e nas posições do objeto a que pertencem (Fig. 3.35).

Feita esta divisão em grupos, a tarefa que se segue consiste em fazer o correto emparelhamento dos pontos terminais dos vários objetos, por forma a realizar posteriormente a reconstrução da porção ou porções das faixas em falta, sendo que cada ponto terminal do grupo 1 (a verde na Fig. 3.35) é emparelhado com um ponto terminal pertencente ao

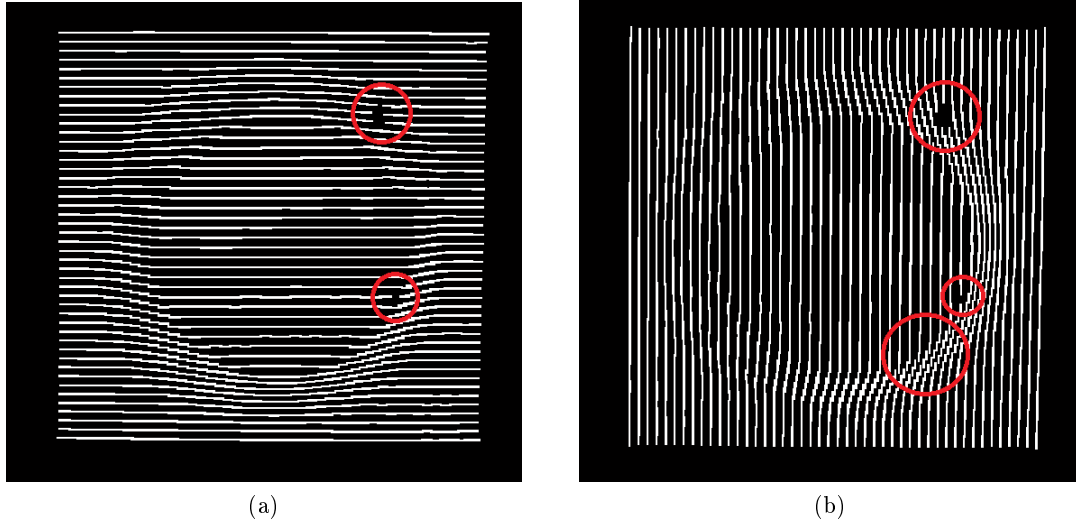


Figura 3.33: Imagens obtidas por meio da dilatação de um padrão de pontos com elementos estruturantes lineares de orientação pré-determinada (a) e de orientação perpendicular a esta (b).

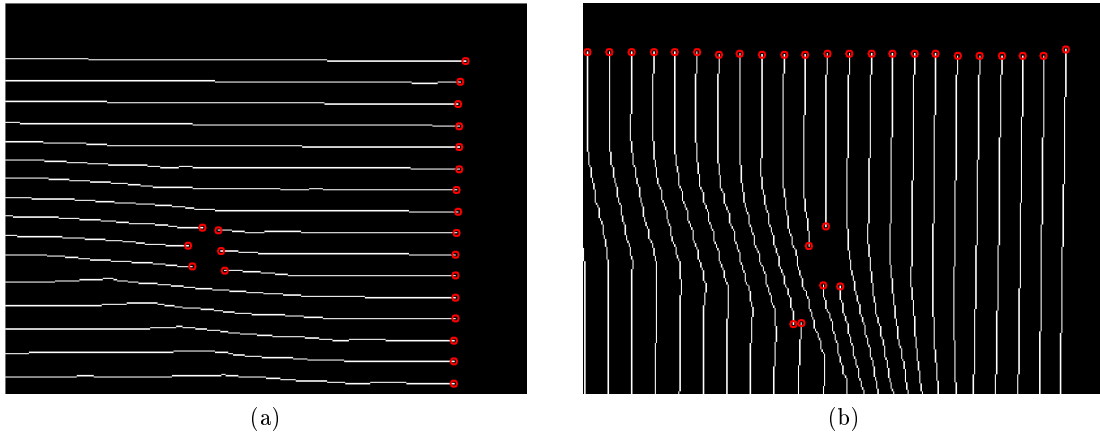


Figura 3.34: Imagens onde é visível a esqueletização da zona superior esquerda dos padrões de faixas presentes em 3.33(a) e em 3.33(b), bem como a localização dos pontos terminais existentes nessa região.

grupo 2 (a vermelho na Fig. 3.35) .

Para proceder a este emparelhamento faz-se uso de um algoritmo de minimização global, o algoritmo de Munkres, também conhecido por algoritmo Húngaro. Este é usado a fim de estabelecer a combinação de emparelhamentos que minimiza a soma das distâncias entre os vários pontos terminais emparelhados. Para melhor entender o funcionamento deste algoritmo, é apresentado o seguinte exemplo, no qual é atribuído a um grupo de trabalhadores, um conjunto de tarefas, consoante o custo da realização de cada uma delas por parte de cada um dos trabalhadores.

Seja  $\mathbf{C}$  uma matriz de dimensões  $n \times n$  representando o custo de cada um dos  $n$

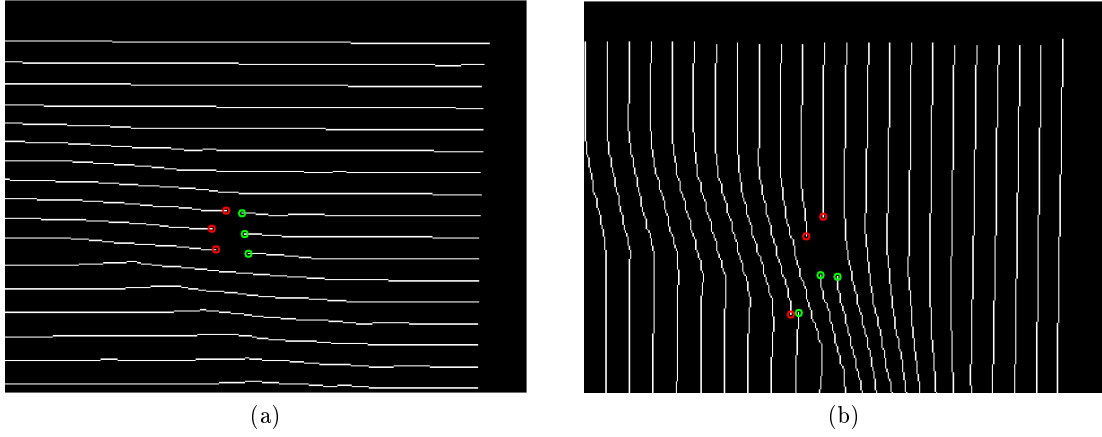


Figura 3.35: Duas imagens de faixas esqueletizadas, contendo em cada uma os dois grupos de pontos terminais a emparelhar.

trabalhadores para realizar cada uma das  $n$  tarefas. O problema consiste em atribuir aos trabalhadores a combinação específica de tarefas que minimiza o custo global, assumindo que cada trabalhador pode realizar uma única tarefa, e que cada tarefa pode apenas ser atribuída a um único trabalhador. A matriz  $\mathbf{C}$  é definida por

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & \begin{matrix} d & e & f \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{pmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 2 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (3.10)$$

As linhas  $\{a,b,c\}$  representam os trabalhadores e as colunas  $\{d,e,f\}$  representam as tarefas. Neste caso a combinação que minimiza o custo global, e que portanto resultaria da aplicação do algoritmo Húngaro é dada por  $\{(a,d), (b,e), (c,f)\}$ , com um custo global de 7 unidades.

No presente caso, a matriz de custos é constituída pelas distâncias entre cada ponto terminal do grupo 1 e todos os pontos terminais do grupo 2, isto para cada uma das 4 imagens. A implementação em Matlab do algoritmo Húngaro usado está abertamente disponível em [50]. Após determinada a combinação que minimiza a distância global, são selecionados os objetos da imagem base que originaram as faixas às quais pertencem os pontos terminais emparelhados. Destes objetos, aqueles que se encontram mais próximos de cada um dos pontos terminais que constituem um par, são unidos por um segmento de reta, recorrendo para isso à função *imline* (Fig.3.36).

As eventuais pequenas ramificações obtidas após este processo, são removidas recorrendo à distância geodésica, tal como sucede em 3.5.5, no processamento dos padrões quadriculados.

Assim, no fim deste processo, obtêm-se quatro imagens de faixas esqueletizadas e sem qualquer interrupção, duas por cada imagem base. As duas imagens de faixas associadas a cada uma das imagens base são interceptadas e os objetos resultantes desta interceptação sofrem uma pequena dilatação. Estes objetos constituem aqueles que se encontram originalmente nas imagens base, bem como os que foram criados no decorrer

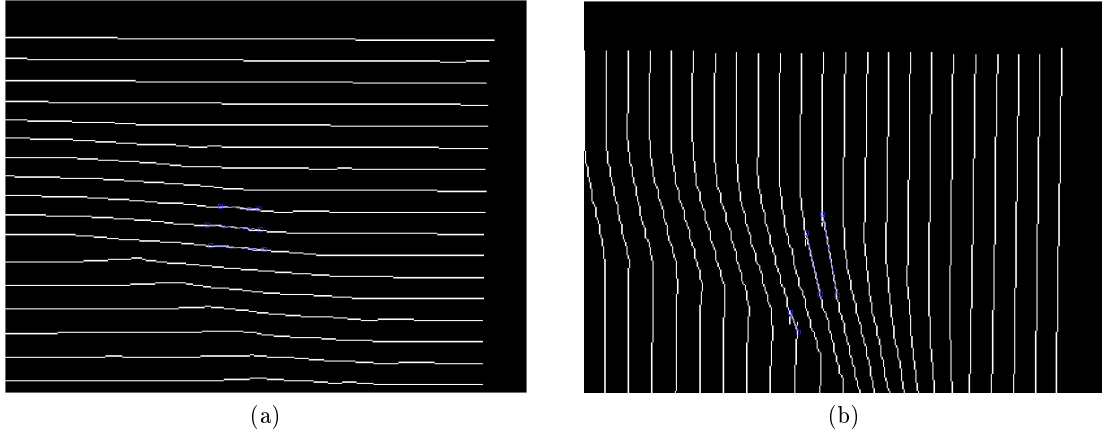


Figura 3.36: Imagens das faixas esqueletizadas referentes a uma das imagens base, contendo as porções em falta reconstruídas.

deste procedimento, nas zonas contendo objetos em falta. O processo pode ser visto como a combinação de dois padrões de faixas, resultando num terceiro padrão em forma de grelha, em que as intercepções constituem tanto os pontos do padrão original, como aqueles que se encontravam em falta, existindo uma grelha associada a cada imagem de um par estéreo.

Caso estejamos perante um padrão de pontos, são adicionados os pontos em falta determinados às imagens originais binarizadas. Caso se trate de um padrão quadriculado, são calculadas as coordenadas dos seus centroides, que são por sua vez adicionadas à matriz contendo as coordenadas das várias intersecções calculadas. Estão assim reunidas as condições necessárias para proceder à correspondência usando a técnica anteriormente referida.

### 3.5.7 Triangulação Estéreo

Determinadas as coordenadas bidimensionais relevantes e feita a sua correspondência, é obtida a disparidade associada a cada ponto do padrão, ou seja, a diferença de abcissas entre os pontos bidimensionais correspondentes. Esta, em conjunto com a informação obtida durante o procedimento de calibração e retificação torna possível a obtenção de uma nuvem de pontos tridimensional, representativa da superfície de cada provete.

Para um sistema estéreo de configuração frontal paralela, sem distorção, alinhado, e em que os planos de imagem das duas câmaras são coplanares, como é o caso do representado pela Fig.3.37, é possível deduzir a profundidade  $\mathbf{Z}$  recorrendo ao princípio da semelhança de triângulos [51]. Esta configuração equivale àquela obtida após a retificação, pelo que cada linha da imagem esquerda se encontra alinhada com a linha correspondente da imagem direita. Assumindo que é possível encontrar um ponto físico  $\mathbf{P}$  cujas coordenadas no eixo  $x$  da imagem esquerda e direita, são dadas respetivamente por  $x^l$  e  $x^r$ , pode-se afirmar que a profundidade  $\mathbf{Z}$  é inversamente proporcional à disparidade, sendo esta última definida por  $d = x^l - x^r$  [51].

Partindo do pressuposto que os pontos principais  $c_x^{\text{left}}$  e  $c_x^{\text{right}}$  possuem as mesmas coordenadas nas respetivas imagens, e que as distâncias focais assumem as duas o mesmo

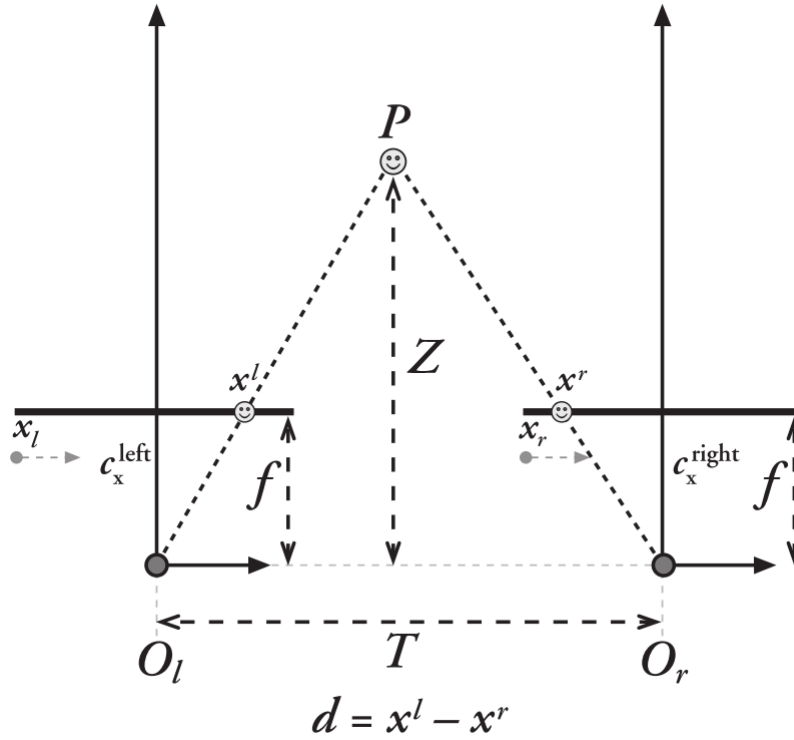


Figura 3.37: Geometria de um sistema estéreo de configuração frontal paralela [51].

valor  $\mathbf{f}$ , é possível definir a profundidade de acordo com a expressão 3.11 [51].

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} \Rightarrow Z = \frac{fT}{x^l - x^r} \quad (3.11)$$

A relação inversa entre a profundidade e a disparidade não é de natureza linear sendo que, para valores de disparidade próximos de 0, pequenas variações na disparidade estão associadas a grandes diferenças na profundidade. Já para valores altos de disparidade, pequenas variações desta não originam grandes alterações na profundidade. Pode-se assim concluir que os sistemas de visão estéreo possuem alta resolução da profundidade apenas para objetos que se encontrem relativamente perto das câmeras [51]. Observando a Fig. 3.38 é possível constatar este facto.

Para determinar a posição tridimensional associada a cada par de coordenadas 2D correspondidas, recorreu-se à função *stereo\_triangulation*, integrante da *toolbox* usada no processo de calibração das câmeras. Esta tem como parâmetros de entrada duas matrizes de dimensões  $2 \times n$  contendo as coordenadas dos pontos da imagem esquerda e dos pontos correspondentes da imagem direita respetivamente, bem como um conjunto de parâmetros obtidos com a retificação. Na Fig. 3.39 é possível observar uma nuvem de pontos tridimensional correspondente a um provete conformado com uma geometria esférica, obtida através de um par estéreo adquirido na configuração de *baseline* longo.

O referencial segundo o qual estão definidas as coordenadas dos vários pontos da nuvem, corresponde à câmera esquerda, podendo no entanto, e caso pretendido, ser

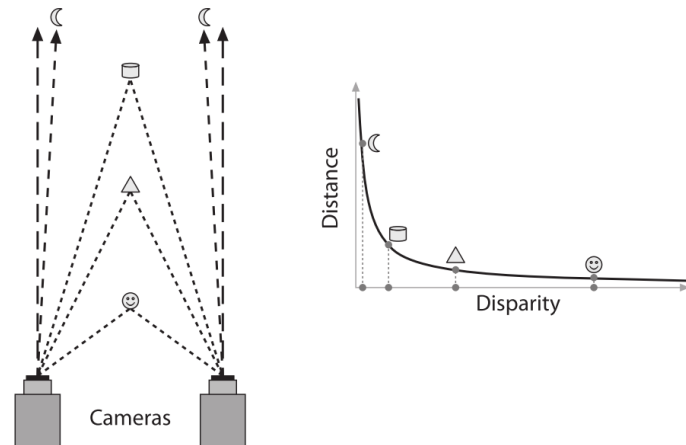


Figura 3.38: Relação inversamente proporcional, e não linear, entre a profundidade e a disparidade num sistema estéreo [51].

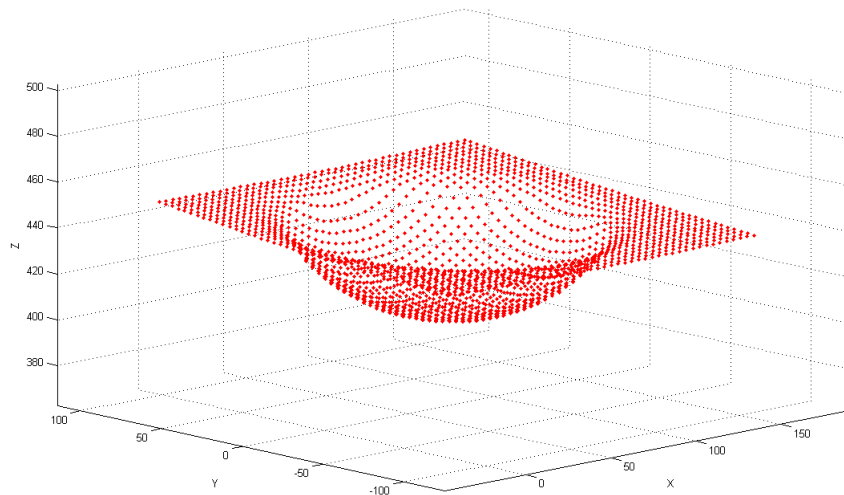
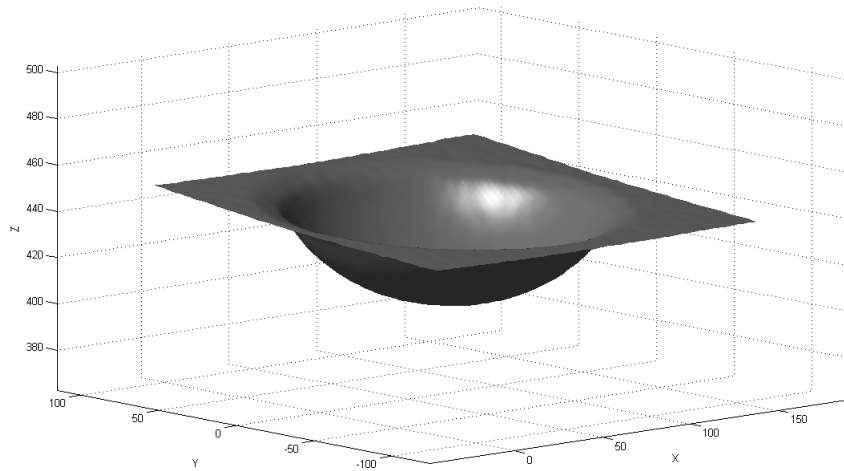


Figura 3.39: Nuvem de pontos de um provete conformado com forma esférica, marcado com um padrão de pontos, e relativa a uma configuração de *baseline* longo.

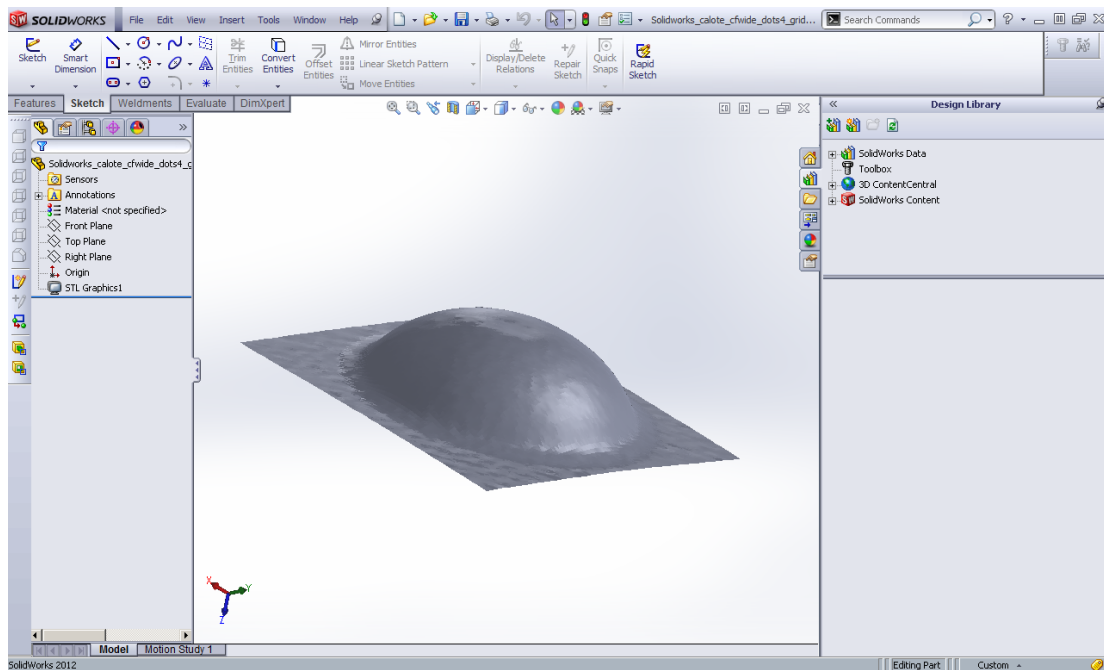
alterado de forma a corresponder à câmera direita. Para facilitar a comparação visual e qualitativa da nuvem de pontos obtida com a forma do provete que lhe deu origem, usou-se a função de uso livre *gridfit* [52], capaz de modelar superfícies dado um conjunto de pontos tridimensionais (Fig. 3.40 (a)).

As superfícies obtidas podem posteriormente ser convertidas em formato STL, de forma a poderem ser lidas por software de modelação 3D. Para tal recorreu-se ao uso da função *stlwrite* [53]. Na Fig. 3.40 (b) é visível o resultado da conversão da superfície representada na Fig. 3.40 (a) para formato STL, visualizado recorrendo ao software *SolidWorks*®.





(a)



(b)

Figura 3.40: Superfície resultante da aplicação da função de modelação *gridfit*, numa nuvem de pontos tridimensionais obtidos por visão estéreo (a), e a sua visualização recorrendo ao *SolidWorks*<sup>®</sup>, após a conversão em formato STL (b).

### 3.5.8 Validação das Reconstruções Obtidas

Ao longo de toda a metodologia de reconstrução, existe um conjunto de fontes de erro que contribuem para que as nuvens de pontos obtidas não constituam uma representação exata da realidade, influenciando deste modo a qualidade das superfícies obtidas. São vários os elementos que podem contribuir para esta discrepância. Seguem-se alguns dos

fatores condicionantes da qualidade das reconstruções obtidas:

- O processo escolhido para proceder à marcação dos padrões, bem como a densidade do padrão marcado;
- As características dos sensores utilizados, nomeadamente a sua resolução;
- A qualidade da calibração e a incerteza inerente aos parâmetros com ela obtidos, bem como o *baseline* associado a cada um das respectivas reconstruções.
- A perda de informação potencialmente relevante durante o processo de binarização adaptativa;
- As transformações aplicadas às imagens e coordenadas bidimensionais, nomeadamente as interpolações inerentes à rotação de imagens binarizadas (como sucede no caso do padrão quadriculado);
- A quantidade de pontos em falta, bem como a incerteza na determinação das coordenadas a eles associadas, durante o processo referido em 3.5.6;

Quantificar adequadamente a contribuição de cada um destes aspetos na alteração da qualidade das reconstruções seria um processo complexo. Desta forma, optou-se por utilizar uma estratégia que permitisse comparar o resultado final de cada uma das reconstruções, com o resultado expectável, ou *ground truth*. Para tal recorreu-se ao uso de uma máquina de medição de coordenadas. Efetuar medições em toda a superfície dos provetes revelar-se-ia basante demorado, pelo que as medições foram realizadas num plano específico. Assim, bloqueado o movimento da sonda de medição ao longo de um dos seus eixos, foi possível realizar a medição da superfície de cada provete num plano situado numa zona intermédia, e definido por dois pontos do padrão situados em extremidades opostas, em conjunto com um terceiro ponto intermédio, sendo todos os três pontos constituintes da mesma faixa. Na Fig. 3.41 (a) é visível o decorrer do processo de medição.

Feitas as medições, obteve-se para cada provete uma curva descritiva da variação da sua altura ao longo da secção definida pelo plano acima referido. Para obter as curvas relativas às respectivas reconstruções, definiu-se para cada uma delas um plano de corte contendo os mesmos três pontos de referência utilizados em cada medição, e obteve-se a intersecção entre este plano e a superfície. Na Fig. 3.41 (b) pode-se observar esta intersecção, bem como a curva dela resultante a cor amarela. Além das superfícies provenientes da aplicação da função *gridfit*, este processo foi também aplicado em superfícies compostas por uma malha de elementos triangulares, utilizada no cálculo das deformações. Uma explicação mais detalhada relativa à elaboração desta malha e ao seu propósito pode ser consultada mais à frente no Capítulo 4, referente ao cálculo das deformações.

Para proceder à comparação das curvas obtidas com as curvas de referência, foram aplicadas uma série de transformações. Primeiramente uma transformação para tornar coincidentes ambos os planos onde estas se situam. Seguiu-se a aplicação de uma translação de modo a tornar coincidentes o primeiro ponto de cada uma das curvas. E ainda uma rotação, de modo a que o ângulo formado entre a horizontal e o segmento de recta que une o primeiro e o último ponto de cada curva apresentasse um valor nulo. Por último, todas as curvas foram normalizadas em  $x$ . Na Fig. 3.42 são visíveis as três curvas

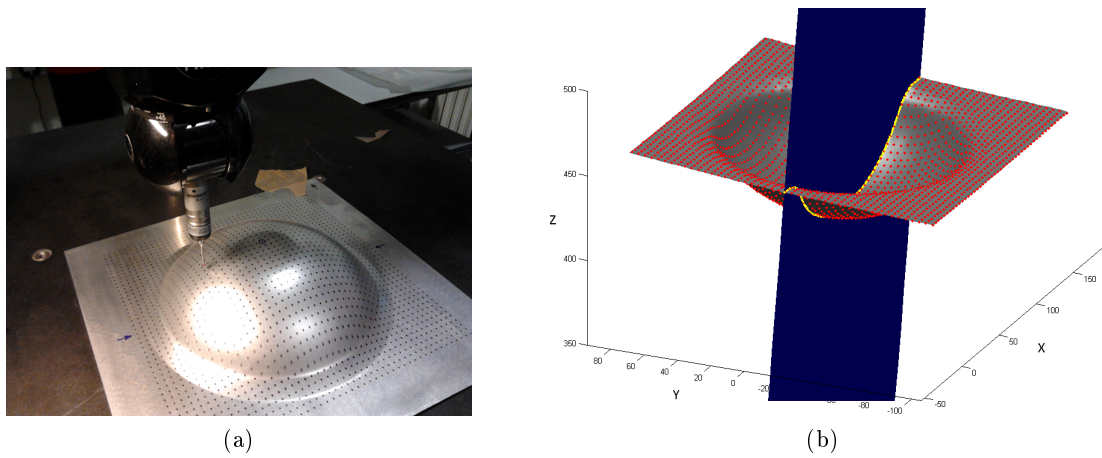


Figura 3.41: Medição de uma secção de um provete utilizando uma máquina de medição de coordenadas (a) e obtenção da secção correspondente na superfície obtida por visão estéreo (b).

associadas às reconstruções estéreo utilizando os três *baselines* distintos, referente a um mesmo provete esférico marcado com um padrão de pontos, bem como a curva obtida com a máquina de medição de coordenadas.

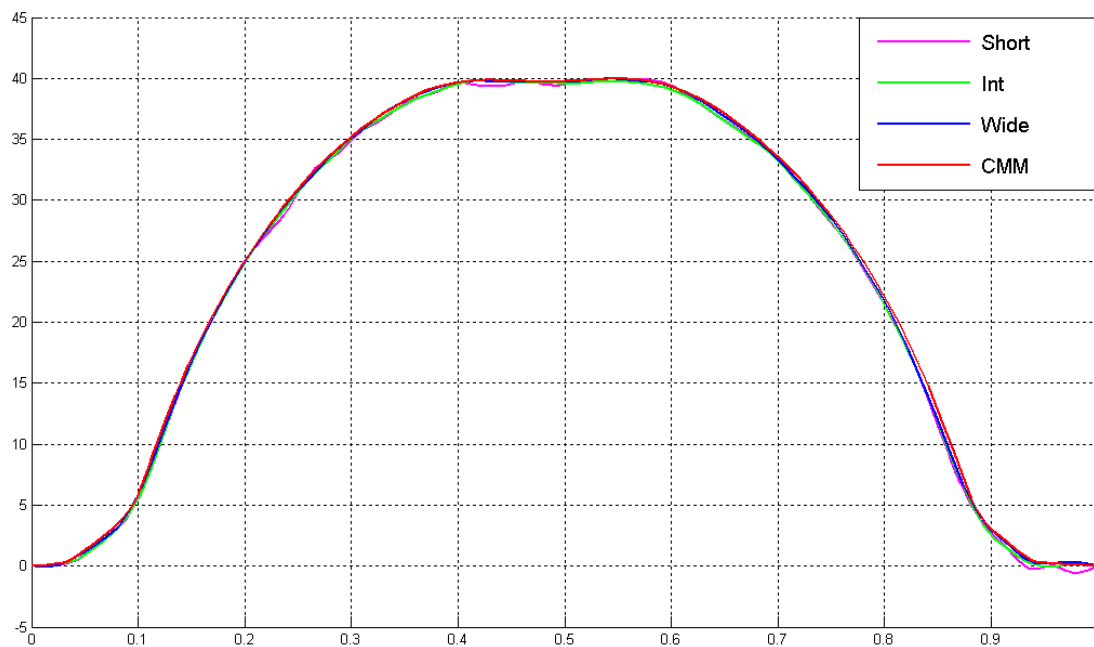


Figura 3.42: Gráfico onde são visíveis os perfis referentes a três reconstruções estéreo do mesmo provete utilizando o *baseline* curto, intermédio e longo ( *short*, *int* e *wide*), bem como a curva formada pelos pontos adquiridos com a máquina de medição de coordenadas (CMM).

Com base na curva obtida com a máquina de medição de coordenadas, foram interpolados 1000 pontos igualmente distribuídos ao longo do eixo  $x$ , representantes da *ground truth*. Para a abscissa de cada um destes pontos foram interpoladas as ordenadas relativas às restantes curvas, tendo sido calculada a diferença entre estas e as ordenadas dos pontos de referência. Assim foi possível obter uma medida aproximada da discrepância entre as várias reconstruções estéreo e os provetes que lhes deram origem. Para facilitar a sua análise recorreu-se à representação dos histogramas de distribuição dos erros, e ao cálculo da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), de acordo com a expressão 3.5.8. Esta é uma métrica frequentemente usada para medir a diferença entre valores previstos por um modelo e os valores observáveis.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{obs},i} - Y_{\text{model},i})^2}{n}} \quad (3.12)$$

Os histogramas referentes à distribuição do erro em cada uma das reconstruções analisadas, bem como os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio, encontram-se expostos no capítulo referente aos resultados, na secção 5.1.1.

## Capítulo 4

# Cálculo das Deformações

### 4.1 Fundamentação Teórica

Após obtidas as várias nuvens de pontos, é possível obter informação relativa às deformações sofridas durante o processo de conformação, desde que seja conhecido o espaçamento inicial entre os elementos do padrão. Este espaçamento sofre alterações de variadas magnitudes consoante a deformação sofrida nas diferentes zonas dos provetes, e a sua análise constitui assim o ponto de partida para o estudo da distribuição das deformações.

A metodologia adotada baseia-se no trabalho desenvolvido por R. Sowerby [22], tendo contudo sido aplicada por outros autores em inúmeros trabalhos desde então, como é o caso de J.H. Vogel [54], bem como em sistemas de análise de deformações mais recentes como o ASAME - *The Automated Strain Analysis and Measurement Environment* [55].

Assumindo que a nuvem de pontos pode ser organizada numa malha de quadriláteros, o primeiro passo consiste em dividir cada um destes em dois triângulos. O resultado é uma malha de regiões triangulares que descreve aproximadamente a superfície do provete.

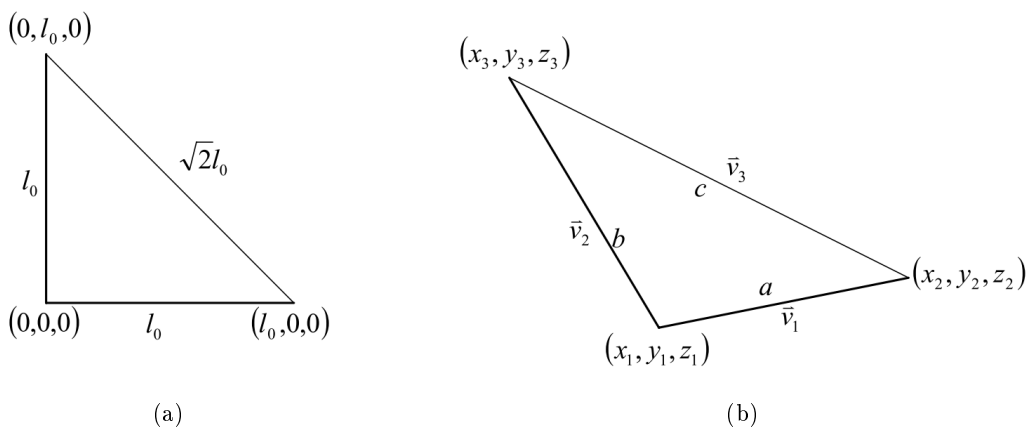


Figura 4.1: Representação de um triângulo antes (a) e depois (b) de sofrer uma deformação [55].

Para tornar mais simples o processo de cálculo das deformações, esta divisão é feita segundo a mesma orientação. Em cada uma das regiões triangulares, assume-se um estado

de deformação homogêneo puro. Um conjunto de linhas inicialmente perpendiculares é escolhido para representar um referencial  $(x,y)$ , em que cada um dos eixos é paralelo a um dos catetos dos vários triângulos retângulos, constituintes de um hipotético padrão pré-deformação. Cada um dos triângulos pré-deformação pode assim ser comparado com o triângulo originado pelo processo de conformação. Na Fig. 4.1 é possível observar uma representação do triângulo original (a), de lado  $l_0$ , correspondente a 4 mm, e o triângulo após deformação (b), em que  $a$  e  $b$  representam o novo comprimento dos catetos, e  $c$  representa o novo comprimento da hipotenusa.

Assim, os vários lados do triângulo deformado podem ser definidos pelos seguintes vetores:

$$\begin{aligned}\vec{v}_1 &= (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1), \\ \vec{v}_2 &= (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1), \\ \vec{v}_3 &= (x_3 - x_2, y_3 - y_2, z_3 - z_2).\end{aligned}\tag{4.1}$$

Vetores estes cujas normas representam os referidos comprimentos  $a$ ,  $b$  e  $c$  respetivamente.

As deformações podem ser obtidas através dos rácios de alongamento e das variações dos ângulos, recorrendo para isso ao uso de um tensor de deformações denominado tensor de Cauchy-Green  $\mathbf{C}$  [54]. Este pode ser expresso de acordo com a sua relação com o rácio de alongamento, pela seguinte equação:

$$\left[ \frac{l}{l_0} \right]^2 = \mathbf{C},\tag{4.2}$$

onde  $l/l_0$  é o rácio entre o comprimento final e o comprimento inicial de um mesmo segmento.

As componentes do tensor das deformações podem então ser calculadas a partir dos vetores:

$$C_{11} = \frac{|\vec{v}_1|^2}{l_0^2} = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}{l_0^2} = \frac{a^2}{l_0^2},\tag{4.3}$$

$$C_{22} = \frac{|\vec{v}_2|^2}{l_0^2} = \frac{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}{l_0^2} = \frac{b^2}{l_0^2},\tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}C_{12} &= \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{l_0^2} = \frac{(x_2 - x_1)(x_3 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_1) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}{l_0^2} \\ &= \frac{|\vec{v}_1|^2 + |\vec{v}_2|^2 - |\vec{v}_3|^2}{2l_0^2} = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2l_0^2}.\end{aligned}\tag{4.5}$$

Para proceder ao cálculo das deformações lagrangianas parte-se da relação do seu tensor  $\mathbf{E}$  com o tensor de Cauchy-Green  $\mathbf{C}$ , expressa por:

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} + 2\mathbf{E},\tag{4.6}$$

onde  $\mathbf{I}$  representa a matriz identidade. Assim, as deformações lagrangianas podem ser expressas da seguinte forma:

$$E_{11} = \frac{C_{11} - 1}{2} = \frac{a^2}{2l_0^2} - \frac{1}{2}, \quad (4.7)$$

$$E_{22} = \frac{C_{22} - 1}{2} = \frac{b^2}{2l_0^2} - \frac{1}{2}, \quad (4.8)$$

$$E_{12} = \frac{C_{12}}{2} = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{4l_0^2}, \quad (4.9)$$

sendo que as expressões 4.7, 4.8 e 4.9 representam respectivamente a deformação na direção  $x$ , na direção  $y$  e na direção  $xy$ . Uma vez que as equações para a transformação de um estado plano de deformação são da mesma natureza que as equações para a transformação de um estado plano de tensão, o uso do círculo de Mohr pode ser estendido ao estudo do presente caso, possibilitando assim o cálculo das deformações reais [55].

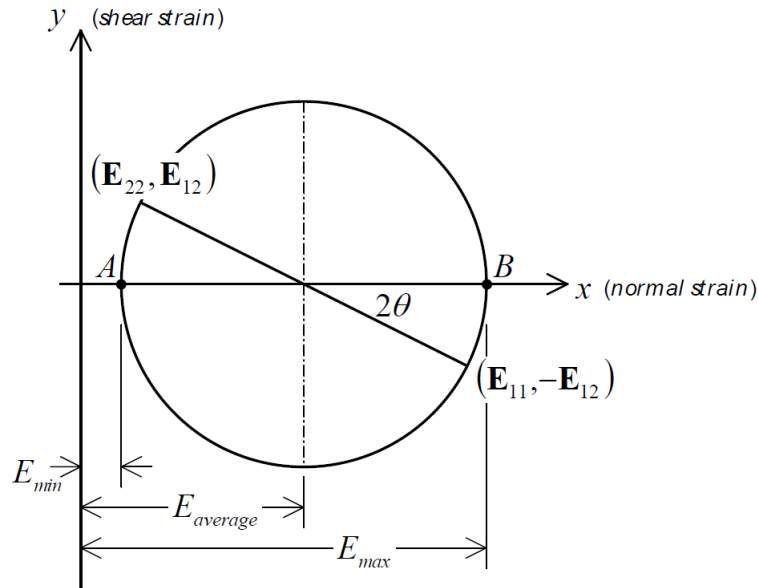


Figura 4.2: Círculo de Mohr para um estado plano de tensão [55].

Na Fig.4.2 observa-se uma representação do círculo de Mohr para o caso em que  $E_{12}$  apresenta valor positivo. O centro do círculo, situado no eixo  $x$ , tem como abcissa o valor médio das deformações nas direções  $x$  e  $y$ , dado pela expressão 4.10. O raio do círculo é obtido através da distância entre o ponto **A** e o ponto **B**, conforme a expressão 4.11.

$$E_{\text{media}} = \frac{E_{11} + E_{22}}{2} \quad (4.10)$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{(E_{11} - E_{22})^2 + (2E_{12})^2} \quad (4.11)$$

Assim, os valores máximo e mínimo da deformação lagrangiana são respetivamente obtidos pela expressão 4.12 e 4.13.

$$E_{\min} = E_{\text{media}} - r \quad (4.12)$$

$$E_{\max} = E_{\text{media}} + r \quad (4.13)$$

Dadas as expressões 4.2 e 4.6, que relacionam o rácio de alongamento e o tensor de Cauchy-Green da seguinte forma:

$$\left[ \frac{l}{l_0} \right]^2 = C = 1 + 2E, \quad (4.14)$$

é possível expressar as deformações reais na forma logarítmica, a partir do rácio de alongamento e em termos de deformações lagrangianas, de acordo com a expressão seguinte:

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{l}{l_0} \right) = \ln \sqrt{1 + 2E}. \quad (4.15)$$

Pode-se então concluir que as deformações principais mínima e máxima são dadas respetivamente pelas expressões

$$\varepsilon_{\min} = \ln \sqrt{1 + 2E_{\min}} = \frac{1}{2} \ln (1 + 2E_{\min}), \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_{\max} = \ln \sqrt{1 + 2E_{\max}} = \frac{1}{2} \ln (1 + 2E_{\max}). \quad (4.17)$$

Da análise do círculo de Mohr pode-se ainda deduzir a relação entre o ângulo da deformação principal máxima e as deformações lagrangianas de acordo com a expressão

$$\tan(2\theta) = \left( \frac{E_{12}}{E_{11} - E_{\text{media}}} \right) \Leftrightarrow \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2E_{12}}{E_{11} - E_{22}} \right). \quad (4.18)$$

É ainda possível converter a deformação real em deformação de engenharia, deformação de espessura e deformação equivalente, recorrendo respetivamente às expressões seguintes:

$$\varepsilon_{\text{engenharia}} = \exp(\varepsilon_{\text{real}}) - 1, \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_{\text{espessura}} = -\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}, \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{\text{equivalente}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{\max}^2 + \varepsilon_{\min}^2 + \varepsilon_{\max} \varepsilon_{\min}}. \quad (4.21)$$



## 4.2 Procedimento

Para calcular as deformações em toda a superfície foi em primeiro lugar necessário organizar a nuvem sob a forma de uma malha de elementos triangulares. A identidade de cada ponto das nuvens tridimensionais obtidas com a triangulação, está relacionada com o processo de catalogação dos objetos da imagem esquerda de referência de cada um dos pares estéreo, através do uso da função *bwlabel*, no decorrer do processo de correspondência. De forma a facilitar a estruturação de uma malha triangular, foi realizada uma renumeração dos vários elementos das nuvens, a fim de obter uma ordem lógica e semelhante para todas as nuvens de pontos, independentemente da morfologia do provete a que se encontram associadas.

Para tal, o primeiro passo foi o cálculo do centroide da nuvem de pontos e a identificação dos 3 pontos dela constituintes, que se encontram mais afastados deste. Estes pontos encontram-se situados nos cantos do provete e servem para definir um plano de referência. Com eles, é possível encontrar um plano definido por um ponto e por um vetor normal unitário, que minimiza a soma dos quadrados das distâncias ortogonais entre os pontos e o referido plano, através da decomposição em valores próprios. Supondo que  $X, Y$  e  $Z$  são vetores coluna de dimensão  $3 \times 1$  contendo as respetivas coordenadas dos 3 pontos seleccionados, e que  $xm, ym$  e  $zm$  constituem as médias de  $X, Y$  e  $Z$  respetivamente, é possível formar uma matriz  $\mathbf{A}$  de dimensões  $3 \times 3$  com a seguinte estrutura:

$$\mathbf{A} = [X - xm, Y - ym, Z - zm] \quad (4.22)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (4.23)$$

Da decomposição em valores próprios da matriz  $\mathbf{A}$  (4.23), é possível obter o vetor próprio correspondente ao menor dos valores próprios, situado na última coluna da matriz  $\mathbf{V}$ , e que representa o vetor normal ao plano, definido no sentido acima referido.

Definido o plano de referência, é feita uma transformação de referencial, de modo a que este represente o novo plano  $Z = 0$ , e que o novo eixo  $Z$  seja portanto definido pelo vetor normal obtido, aqui denominado por  $\vec{Z}_n$ , sendo a origem  $O_n$  deste novo referencial representada pelas coordenadas de um dos 3 pontos inicialmente seleccionados. Por sua vez, o vetor que representa o novo eixo  $Y$ , denominado  $\vec{Y}_n$ , é obtido através do produto vetorial entre o vetor relativo ao eixo  $X$  original e o vetor  $\vec{Z}_n$ . Por último o vetor relativo ao novo eixo  $X$ , ou seja  $\vec{X}_n$ , resulta do produto vetorial entre  $\vec{Z}_n$  e  $\vec{Y}_n$ .

Definidos os eixos do novo referencial, é criado para cada ponto da nuvem original, um vetor entre este e a nova origem  $O_n$ , obtido através da subtração entre as coordenadas do ponto e as coordenadas da origem  $O_n$ , sendo que as novas coordenadas  $(x_n, y_n, z_n)$  de cada ponto da nuvem resultam respetivamente do produto escalar de cada um destes vetores com os vetores  $\vec{X}_n, \vec{Y}_n$  e  $\vec{Z}_n$ .

Na Fig. 4.3, é possível observar uma nuvem de pontos original na imagem (a), vista do referencial câmara esquerda, bem como o resultado da mudança de referencial na imagem (b), onde é visível o alinhamento do plano de referência com o plano  $Z=0$ ;

Realizada a alteração de referencial, é obtida a projecção dos pontos da nuvem no plano  $Z=0$ , e é criada uma grelha virtual, correspondente à geometria do padrão marcado antes

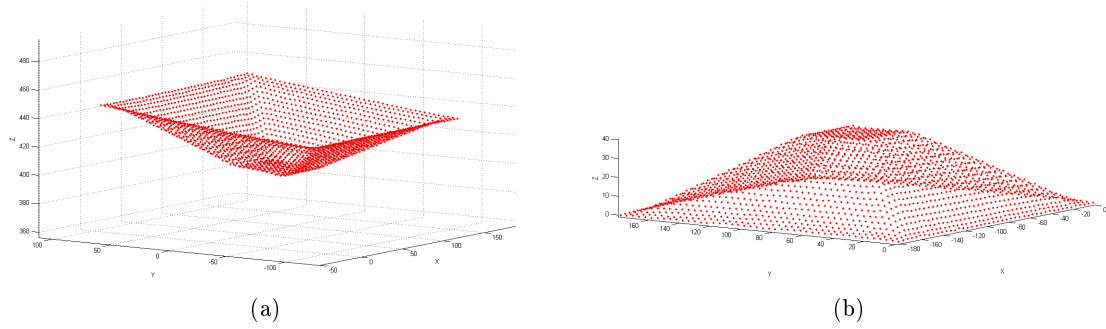


Figura 4.3: Representação da nuvem de pontos no seu referencial original, correspondente à câmera esquerda (a), e representação da nuvem de pontos após uma transformação do referencial (b).

de ter sido deformado, e por isso constituída por pontos com um espaçamento regular de 4 mm.

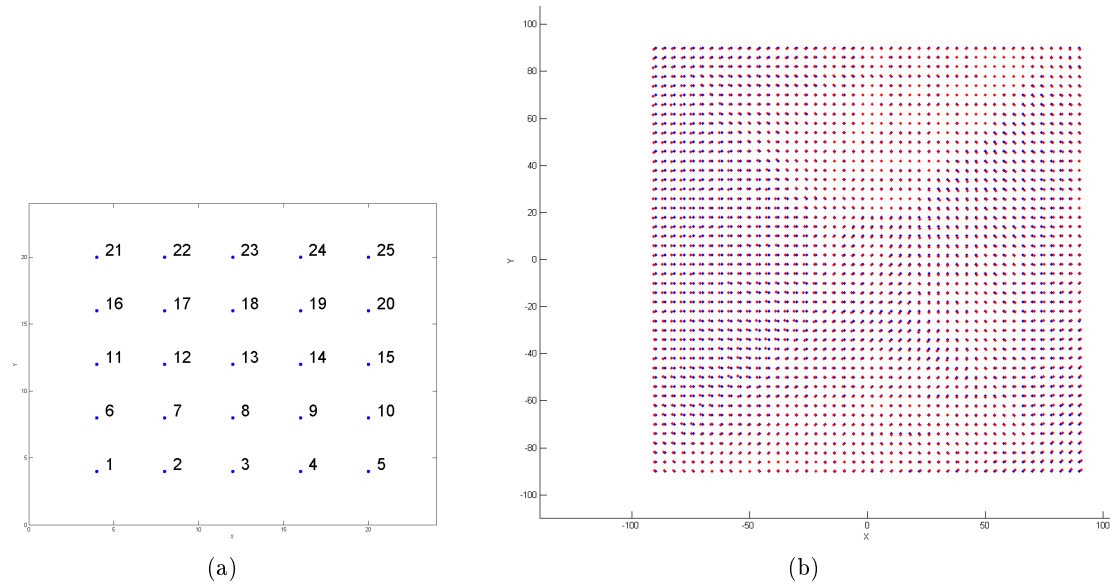


Figura 4.4: A imagem (a) constitui uma exemplificação do esquema de numeração de pontos aplicado na grelha virtual. Em (b) observam-se a grelha virtual de pontos a azul, e a vermelho a grelha resultante da projeção dos pontos da Fig.4.3 (b) sobre o plano  $Z=0$ .

A grelha virtual possui pontos com uma numeração atribuída de forma específica, de acordo com o esquema apresentado na Fig. 4.4 (a).

A grelha de pontos resultantes da projeção é alinhada com a grelha virtual criada, de maneira a que o ângulo formado entre a linha que une os seus pontos das extremidades superiores e a horizontal seja de  $0^\circ$ , e de forma a que os centroides de ambas as grelhas sejam coincidentes e estejam situados na origem. Na Fig. 4.4(b) é possível observar a grelha de pontos virtual a azul, e a vermelho a grelha de pontos resultante da projeção da

nuvem da Fig. 4.3 (b) sobre o plano  $Z=0$ , ambas alinhadas e coincidentes nos respectivos centroides.

De seguida é usado o algoritmo Húngaro para obter a correspondência entre cada ponto da grelha virtual e o respetivo ponto da projeção, sendo que cada um dos pontos da nuvem tridimensional obtida por visão estéreo é re-catalogado com o número atribuído ao ponto da grelha virtual que se encontra associado à sua projeção. Desta forma obteve-se uma numeração que segue uma organização específica e igual para todas as nuvens de pontos obtidas, tornando assim fácil a construção de uma malha triangular. Na Fig. 4.5 é possível observar a malha elaborada para uma nuvem de pontos obtida a partir da reconstrução estéreo de um provete de forma piramidal.

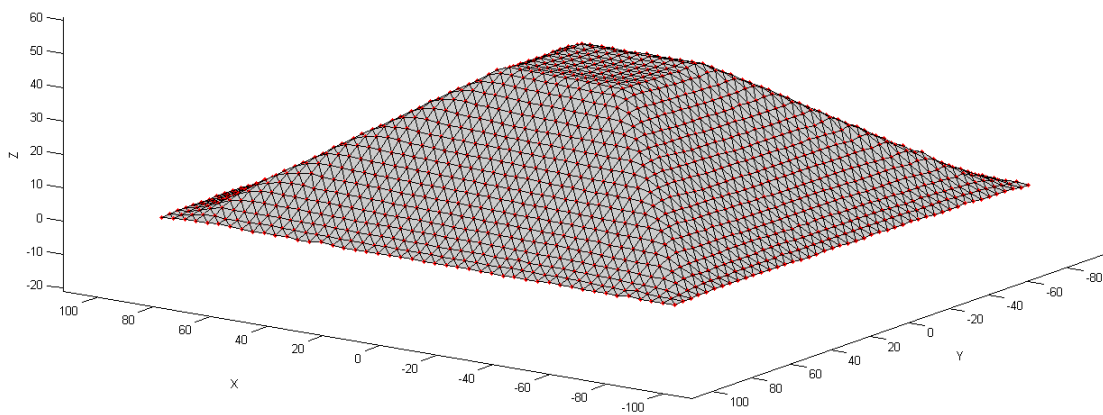


Figura 4.5: Malha de elementos triangulares obtida a partir da nuvem de pontos de um provete com forma piramidal.

As deformações para cada um destes elementos triangulares são calculadas de acordo com a metodologia expressa na secção 4.1. Estas são apelidadas de deformações elementares.

À semelhança do software ASAME, foi ainda desenvolvida uma metodologia para calcular as deformações nodais, ou seja as deformações associadas a cada um dos pontos da nuvem. Estas são calculadas tendo em conta as deformações relativas aos elementos triangulares vizinhos, podendo estes estar dispostos de diferentes formas, e ter relevâncias distintas. As deformações nodais foram assim calculadas de três maneiras distintas. A primeira recorre ao cálculo de uma média ponderada da deformação lagrangiana dos oito triângulos vizinhos, de acordo com a Fig. 4.6 (a). Na segunda recorre-se apenas ao cálculo da média das deformações lagrangianas dos quatro triângulos que contêm o nó analisado na sua constituição, de acordo com a Fig. 4.6 (b). Já na terceira é calculada uma média das deformações lagrangianas dos seis triângulos adjacentes ao nó, tendo em conta a distribuição que se observa na Fig.4.6 (c). As deformações nodais reais associadas a cada um dos nós são posteriormente obtidas de acordo com a formulação matemática referida em 4.1.

A primeira estratégia (4.6 (a)) tende a produzir resultados mais exatos na análise de superfícies com transições suaves no que diz respeito às deformações. A segunda (4.6 (b)) permite a obtenção das deformações localizadas com mais precisão, já que os elementos

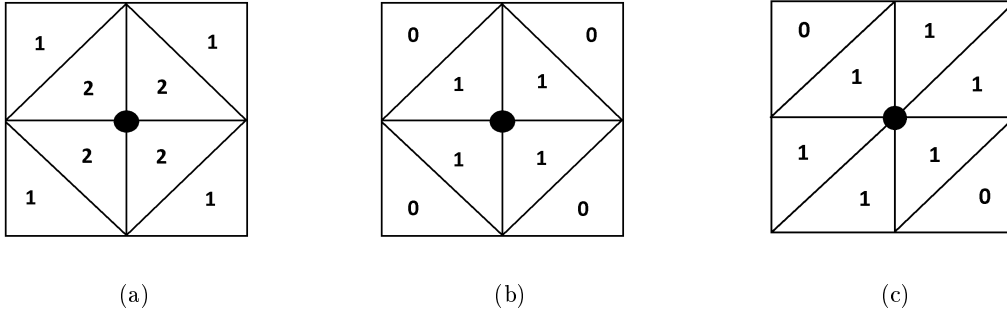


Figura 4.6: A figura representa as três estratégias distintas utilizadas no cálculo das deformações nodais, e os números representam o peso que cada um dos elementos triangulares tem no cálculo da deformação nodal.

mais afastados do nó em análise não são tidos em conta no cálculo da deformação média. Por fim, a terceira estratégia (4.6 (c)) origina resultados de valores intermédios entre a primeira e a segunda [55].

Na Fig. 4.7 pode observar-se o resultado do cálculo das deformações elementares em cada um dos triângulos que compõem a superfície de um provete deformado com forma esférica, mais especificamente, a distribuição das deformações principais máximas.

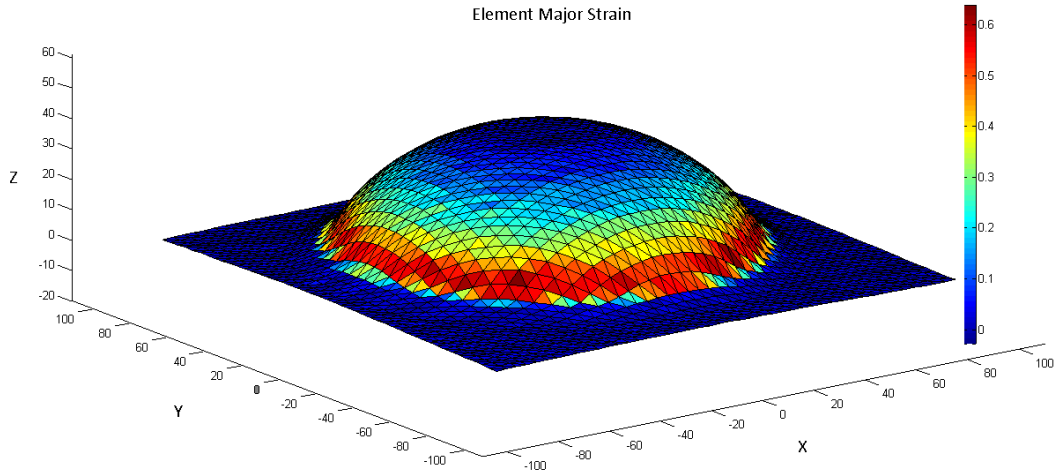


Figura 4.7: Distribuição das deformações principais máximas na superfície de um provete de forma esférica, fruto do cálculo das deformações elementares.

Já na Fig. 4.8 é visível a distribuição das deformações principais máximas resultantes do cálculo das deformações nodais usando a estratégia da média ponderada (Fig. 4.6 (a)), tendo o esquema de cores apresentado sido fruto de uma interpolação com base nas deformações associadas a cada nó.

É também possível obter a relação entre as deformações principais máxima e mínima sob a forma gráfica, semelhante aos diagramas tipicamente utilizados na descrição de curvas limite de deformação. Informação relativa ao número de nós distribuído por cada

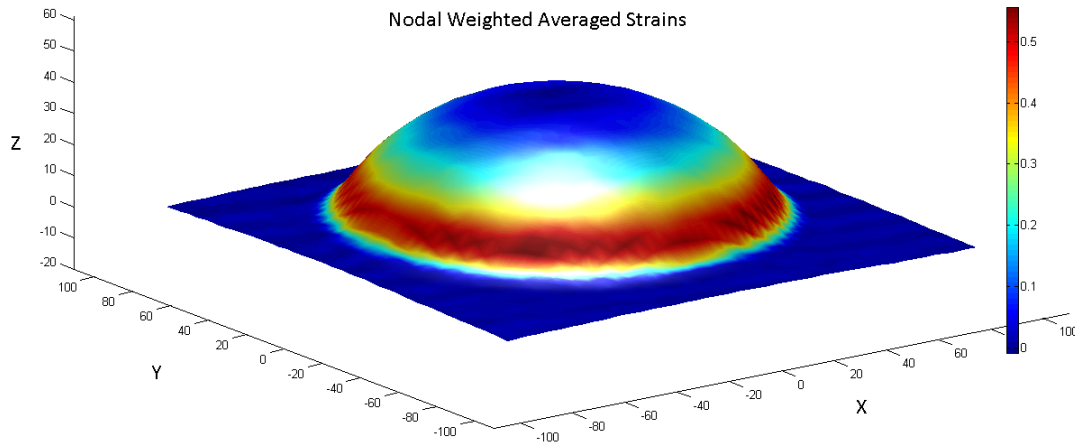


Figura 4.8: Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete de forma esférica, resultante do cálculo das deformações nodais recorrendo à estratégia da média ponderada (Fig.4.6 (a)).

um dos valores de deformação é também obtida facilmente, sobre a forma de diagramas de frequência.

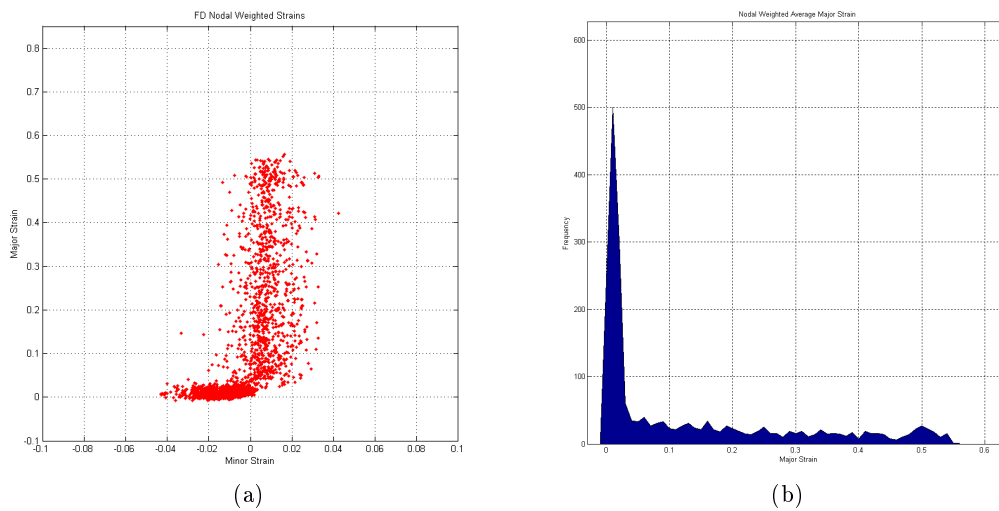


Figura 4.9: Relação entre as deformações principais mínima e máxima para cada um dos nós da nuvem de pontos (a). Distribuição do número de nós pelos vários valores de deformação principal máxima existentes (b). Ambos os gráficos dizem respeito ao cálculo das deformações recorrendo à estratégia da Fig. 4.6 (a) num provete esférico.

Na Fig. 4.9 (a) observa-se a relação entre a deformação principal mínima ( $x$ ) e a deformação principal máxima ( $y$ ) para cada um dos nós. Já na Fig.4.9 (b) é visível o histograma referente à distribuição dos nós ao longo dos vários valores de deformação principal máxima. Ambos os gráficos são referentes a um provete esférico em que as deformações foram calculadas recorrendo à estratégia da média ponderada.

Dado que as deformações nodais são calculadas apenas para os 2116 pontos constituintes de cada um das nuvens, foi desenvolvida uma função que permite a interpolação e obtenção manual do valor da deformação em qualquer região da superfície. Para tal é construída uma grelha de pontos bastante mais densa que a original, posicionada dentro do mesmo espaço  $(x,y)$ , sendo a altura  $(z)$  de cada um dos novos pontos interpolada com base na nuvem de pontos original. Por fim, com base nos valores da deformação nodal associados a cada um dos pontos da nuvem original, é possível interpolar os valores de deformação relativos a cada um dos pontos da nova grelha. Na Fig. 4.10 é visível a nuvem de pontos original (a) e a nova nuvem mais densa (b), constituída por pontos interpolados, bem como a exportação para o *workspace* das coordenadas de uma determinada zona situada entre os pontos originais (a vermelho) (c), por forma a inferir a sua deformação.

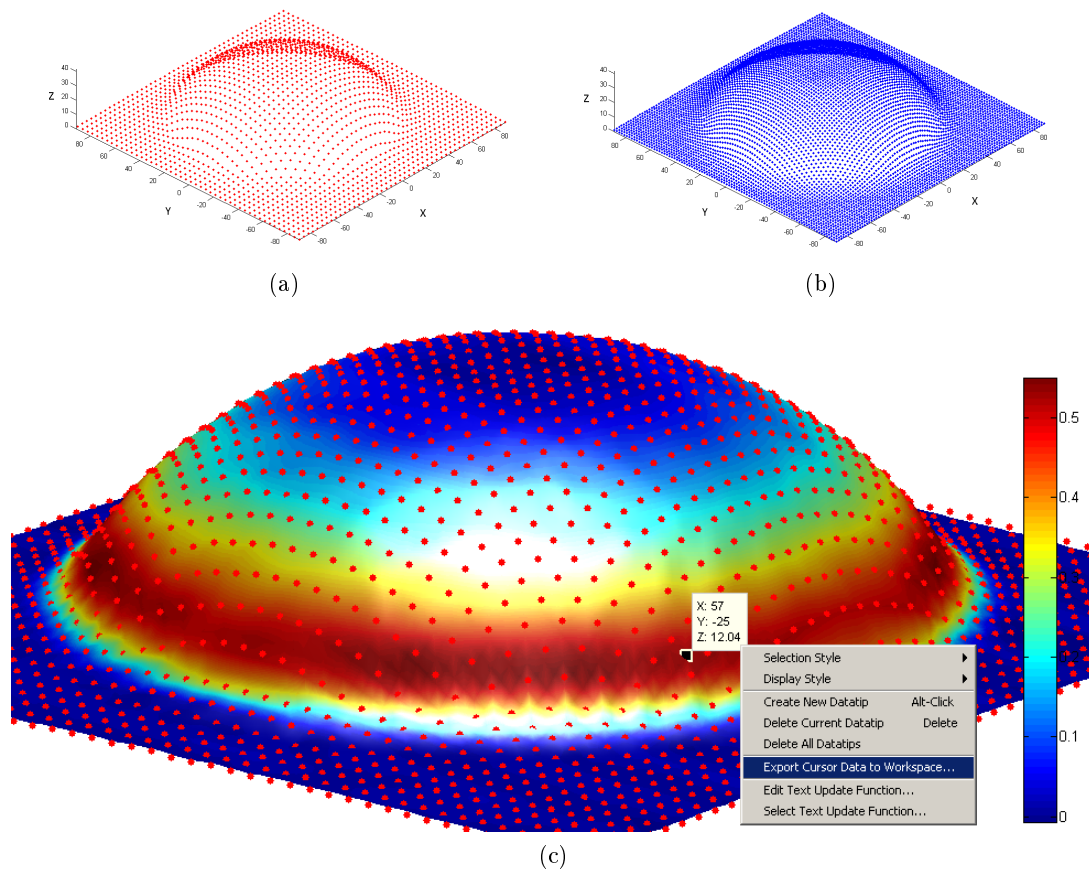


Figura 4.10: Nuvem de pontos original (a), nuvem densa de pontos interpolados (b), e exportação das coordenadas de um ponto interpolado para o *workspace* de forma a obter o valor de deformação a ele associado (c) .

A grelha de pontos interpolados, usada para definir a superfície da Fig. 4.10 e para obter os valores de deformação interpolados possui um espaçamento de 2 mm em  $(x,y)$ . No entanto, este valor pode ser regulado consoante a quantidade e a densidade de informação que se pretende obter.

## Capítulo 5

# Resultados e Discussão

Desenvolvido um sistema de reconstrução tridimensional de superfícies e cálculo das deformações, foi necessário proceder à análise e à validação dos resultados por este obtidos.

Neste capítulo é inicialmente feita uma análise qualitativa dos resultados relativos às reconstruções. Para isso recorre-se a uma demonstração visual dos modelos obtidos sob a forma de superfícies tridimensionais.

Posteriormente é feita uma análise do erro associado aos vários modelos obtidos, com base na metodologia expressa em 3.5.8. Assim, é feita uma exposição das distribuições do erro associadas às várias reconstruções estéreo, permitindo a realização de uma análise quantitativa dos resultados, no sentido de avaliar a sua fiabilidade. O cálculo das deformações está diretamente relacionado com a posição tridimensional de cada elemento da nuvem de pontos, pelo que a qualidade das reconstruções é também ela um bom indicador da qualidade dos respetivos valores de deformação obtidos.

Faz-se também uma exposição visual dos resultados obtidos com o cálculo das deformações, recorrendo à utilização de mapas de cores, representativos da distribuição dos vários valores de deformações calculados ao longo das diferentes superfícies. No que diz respeito às deformações, e dada a grande quantidade de resultados, foram selecionados para exposição apenas aqueles relativos às reconstruções de melhor qualidade, de acordo com a análise do erro acima referida. No entanto, são também apresentadas algumas comparações gráficas entre os resultados das deformações obtidas recorrendo aos diferentes *baselines* e padrões, no sentido de averiguar diretamente o impacto destes nos valores obtidos.

Por fim, são ainda abordados alguns dos problemas e possíveis limitações da metodologia proposta nesta dissertação.

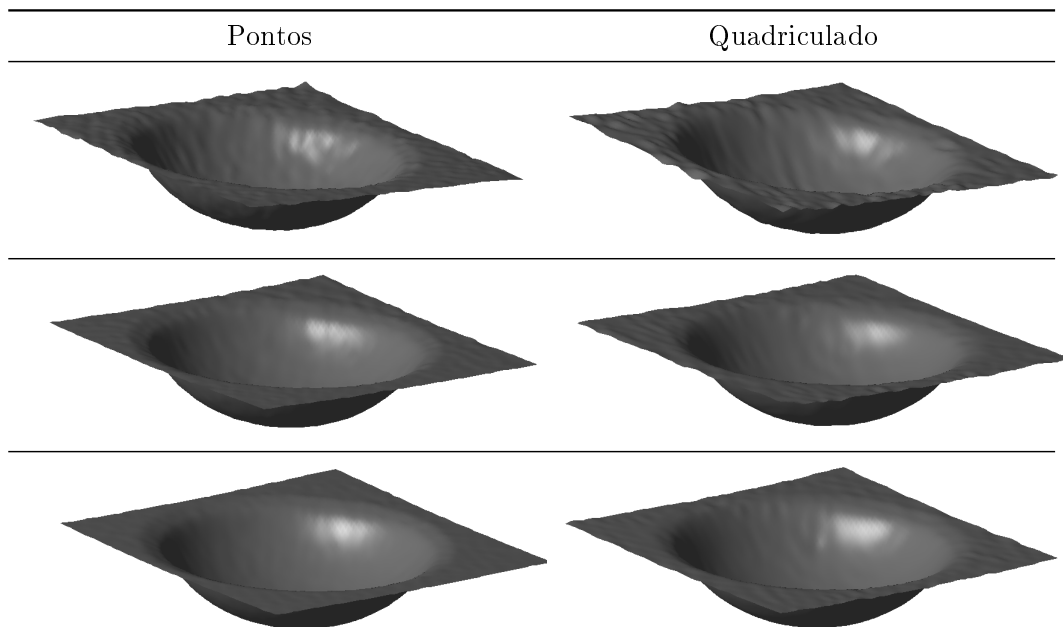
### 5.1 Reconstruções

Do ponto de vista qualitativo, foi desde logo possível observar a diferença entre as reconstruções obtidas por meio de configurações estéreo de *baseline* curto e aquelas obtidas recorrendo a configurações de *baseline* maior. Esta diferença é facilmente observável na Tabela 5.1, em que são apresentados os vários modelos obtidos a partir de um prorete esférico marcado com um padrão de pontos e com um padrão quadriculado, para os vários *baselines* utilizados. Para as reconstruções obtidas usando um *baseline* curto, são

observáveis várias imperfeições e uma irregularidade generalizada da superfície, que não corresponde à forma real do provete. Este efeito negativo tende a desaparecer conforme o *baseline* aumenta, o que é mais facilmente observável na transição entre o *baseline* curto e o *baseline* intermédio.

Relativamente à influência do tipo de padrão marcado na qualidade dos modelos obtidos, esta não parece grande o suficiente para que o seu efeito seja facilmente observável nas reconstruções obtidas com *baseline* curto e intermédio. Contudo, nos modelos obtidos recorrendo ao *baseline* longo, verifica-se que a qualidade da superfície obtida parece ser ligeiramente superior nos casos em que se utilizou um padrão de pontos. O resultado das restantes reconstruções pode ser observado no anexo A.2, nas tabelas A.1 e A.2.

Tabela 5.1: Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes esféricos marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de *baseline* curto, intermédio, e longo, correspondentes respectivamente à primeira, segunda e terceira linhas da tabela.

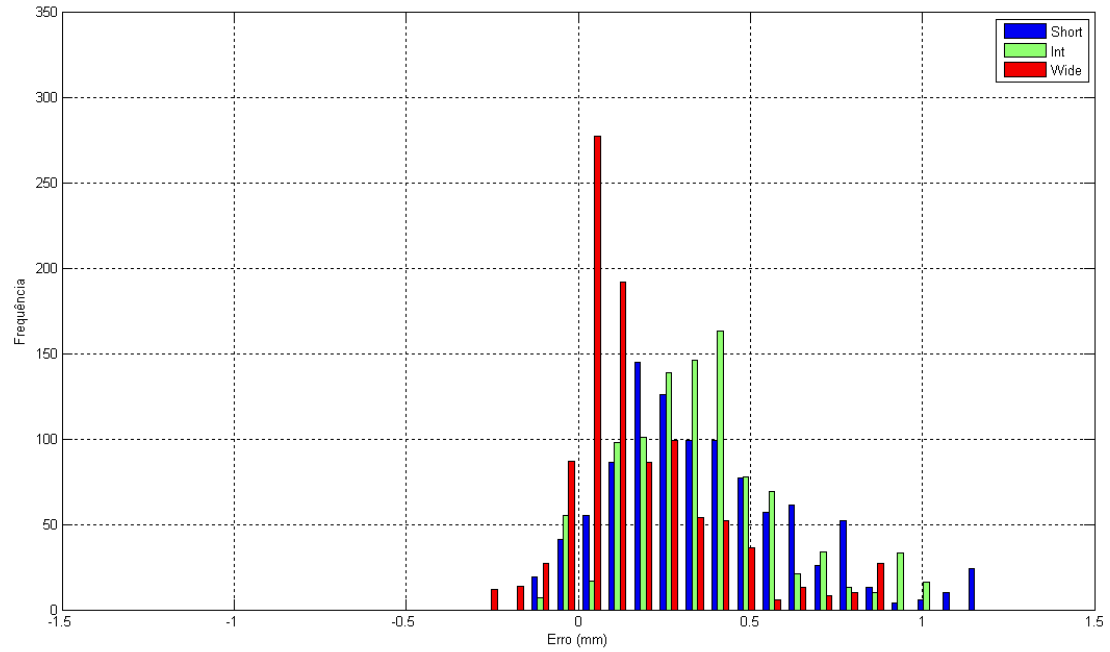


### 5.1.1 Validação das Reconstruções e Estudo dos Erros

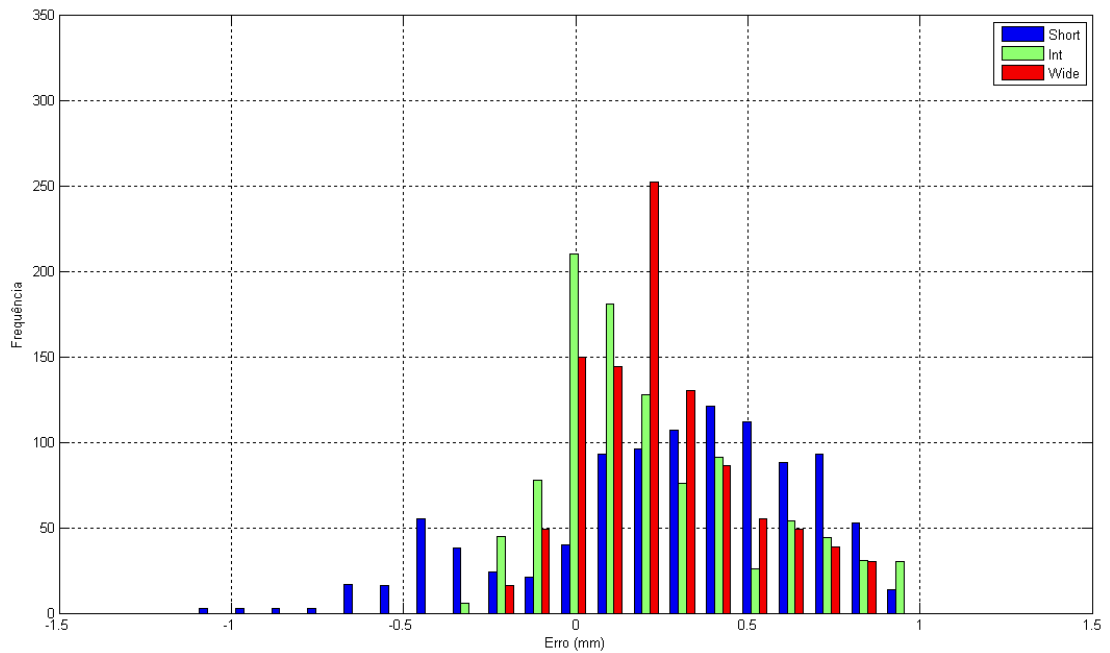
Nesta secção são demonstradas, para os vários modelos, e sobre a forma de histogramas, as distribuições do erro obtidas através da metodologia referida em 3.5.8, referentes a cada uma das superfícies constituídas por elementos triangulares. Cada uma das imagens é constituída por um conjunto de histogramas combinados, referentes às reconstruções de um provete com uma determinada morfologia, e marcado com um dos dois tipos de padrões utilizados, recorrendo às três configurações de *baseline* curto, intermédio e longo.

Na Fig. 5.1 é possível observar as distribuições do erro em milímetros, associadas às reconstruções estéreo de dois provetes esféricos, um deles marcado com um padrão de pontos (Fig. 5.1(a)) e o outro marcado com um padrão quadriculado (Fig. 5.1(b)).





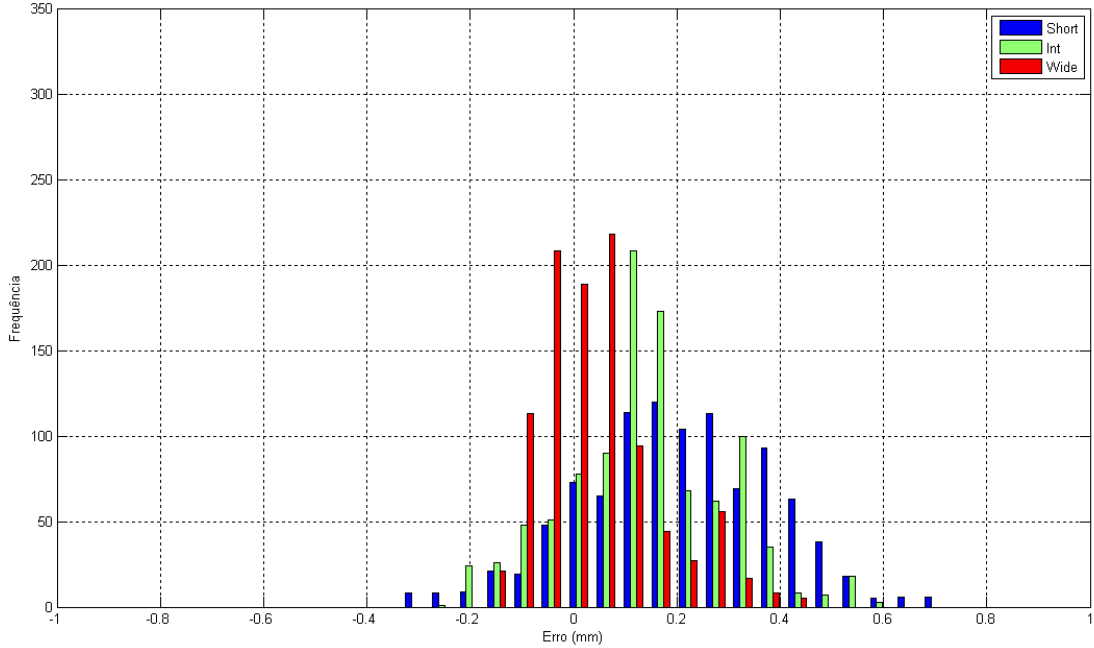
(a)



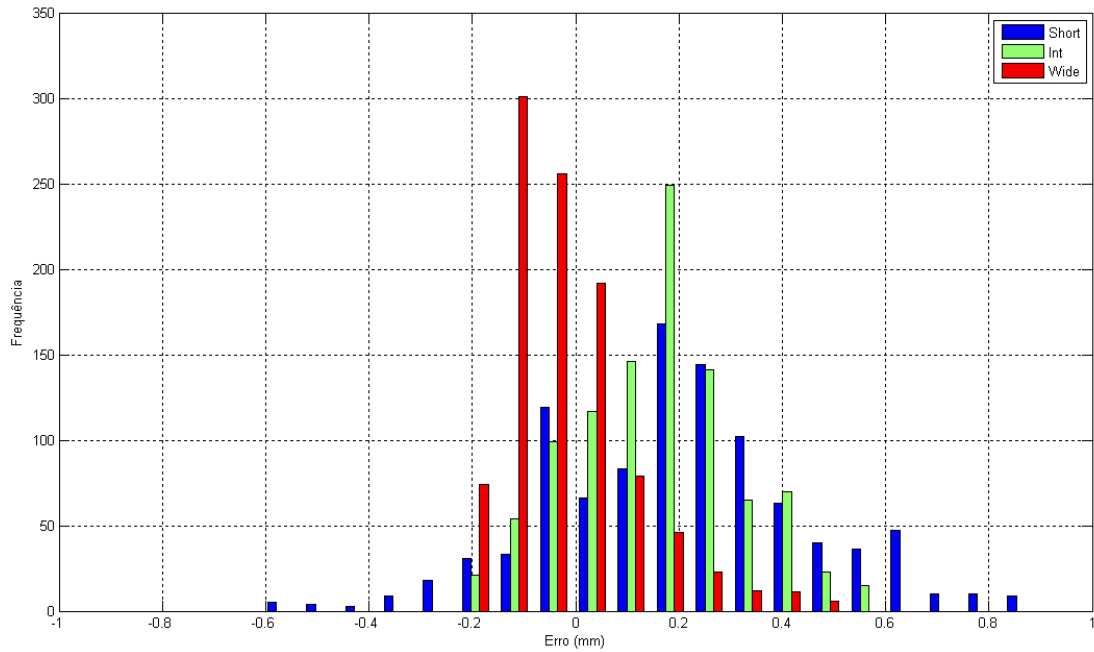
(b)

Figura 5.1: Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete esférico, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos *baselines* curto, intermédio e longo são representadas respetivamente pelas cores azul, verde e vermelho.

Seguem-se na Fig. 5.2 as distribuições do erro associadas à reconstrução de dois provetes de forma piramidal, respetivamente marcados com os dois tipos de padrões.



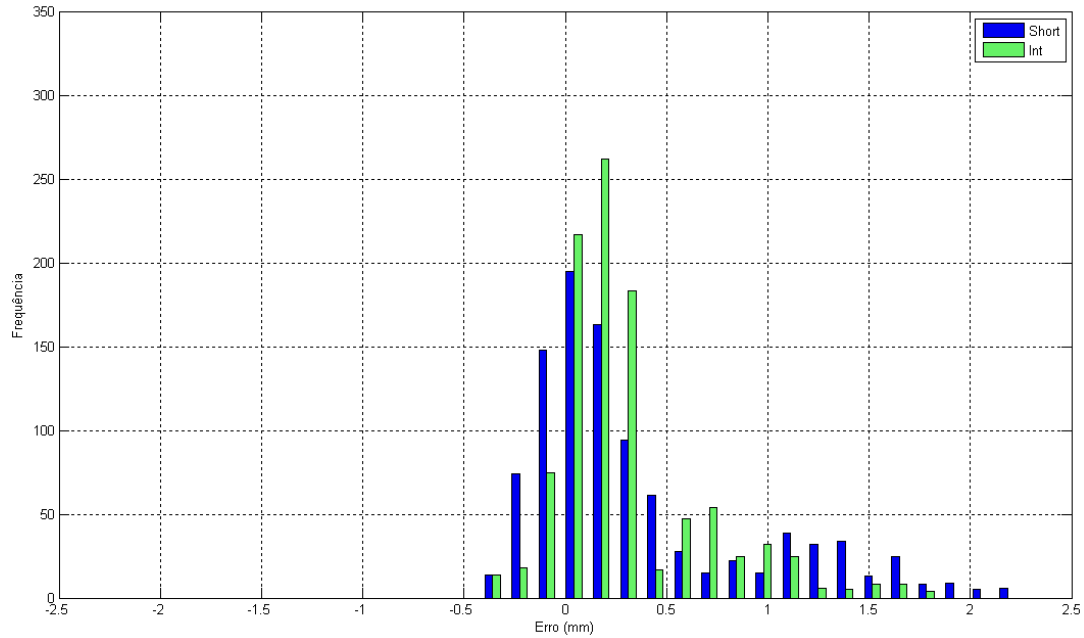
(a)



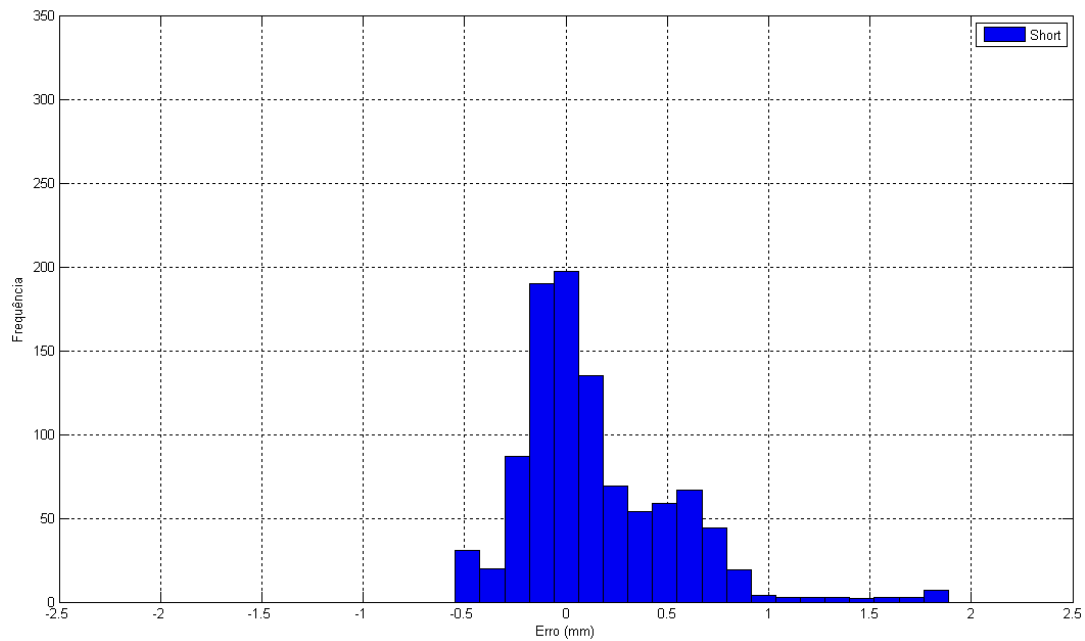
(b)

Figura 5.2: Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete piramidal, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos *baselines* curto, intermédio e longo são representadas respetivamente pelas cores azul, verde e vermelho.

Seguem-se por fim os histogramas relativos às distribuições do erro para as reconstruções de dois provetes de forma cônica.



(a)



(b)

Figura 5.3: Histogramas representativos da distribuição dos erros na reconstrução de um provete cônico, marcado com um padrão de pontos (a) e com um padrão quadriculado (b). As distribuições relativas aos *baselines* curto e intermédio são representadas respetivamente pelas cores azul e verde .

É de referir que para esta última geometria foi apenas possível obter dois modelos relativos ao provete marcado com padrão de pontos, e um só modelo relativo ao provete marcado com o padrão quadriculado, isto devido a algumas limitações da metodologia utilizada, posteriormente evidenciadas na secção 5.3. É ainda de atentar que os vários histogramas apresentados possuem diferentes limites no que toca ao seu eixo horizontal (Erro (mm)) por forma a permitir uma análise mais pormenorizada, pelo que isso deve ser levado em conta na sua comparação. Contudo estes limites só diferem entre os vários tipos de geometrias.

Para facilitar a análise dos erros associado aos respectivos histogramas, apresenta-se a tabela que se segue, contendo os valores em milímetros do erro médio e do desvio padrão, bem como os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio, isto para cada um dos modelos obtidos.

Tabela 5.2: Valores em milímetros do erro médio, desvio padrão (Std.) e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), associados a cada um dos modelos estéreo obtidos, e relativos à malha de elementos triangulares.

| Provete   | Padrão       | Baseline | Erro Médio | Std.   | RMSE   |
|-----------|--------------|----------|------------|--------|--------|
| Esférico  | Pontos       | Curto    | 0.37117    | 0.2755 | 0.4622 |
|           |              | Interm.  | 0.36266    | 0.2325 | 0.4307 |
|           |              | Longo    | 0.16909    | 0.2189 | 0.2765 |
|           | Quadriculado | Curto    | 0.27796    | 0.3997 | 0.4867 |
|           |              | Interm.  | 0.21839    | 0.2943 | 0.3664 |
|           |              | Longo    | 0.24649    | 0.2370 | 0.3419 |
| Piramidal | Pontos       | Curto    | 0.20256    | 0.1835 | 0.2732 |
|           |              | Interm.  | 0.13938    | 0.1537 | 0.2075 |
|           |              | Longo    | 0.043194   | 0.1125 | 0.1204 |
|           | Quadriculado | Curto    | 0.20199    | 0.2497 | 0.3211 |
|           |              | Interm.  | 0.15833    | 0.1609 | 0.2257 |
|           |              | Longo    | -0.02237   | 0.1252 | 0.1271 |
| Cónico    | Pontos       | Curto    | 0.36267    | 0.5609 | 0.6677 |
|           |              | Interm.  | 0.29531    | 0.3712 | 0.4742 |
|           |              | Longo    | _____      | _____  | _____  |
|           | Quadriculado | Curto    | 0.14638    | 0.3840 | 0.4108 |
|           |              | Interm.  | _____      | _____  | _____  |
|           |              | Longo    | _____      | _____  | _____  |

Através da visualização dos vários histogramas e da consulta dos valores presentes na tabela 5.2 é possível tirar algumas elações. Pode-se constatar que a tendência é para que tanto o valor do erro médio como o do desvio padrão sofram uma diminuição com o aumento do *baseline*, o que se traduz a nível dos histogramas por um aumento do número de pontos com erro mais próximo de 0, e pelo seu estreitamento, sinónimo de uma cada vez menor dispersão dos valores do erro em torno da sua média. Estes são indicadores de uma melhoria da qualidade e de um aumento da exatidão dos resultados, e vão de encontro à análise qualitativa das várias superfícies obtidas. Tal como estes, o valor do RMSE é também ele decrescente.

A melhoria resultante do aumento do *baseline* pode ser facilmente compreendida

através da visualização da Fig. 5.4. Observando a referida figura, é possível concluir que à medida que a distância entre as câmaras aumenta, existe uma diminuição da quantidade de pontos físicos possíveis de serem projetados em dois pixels correspondentes, evidenciado graficamente pela diminuição da área de intercepção.

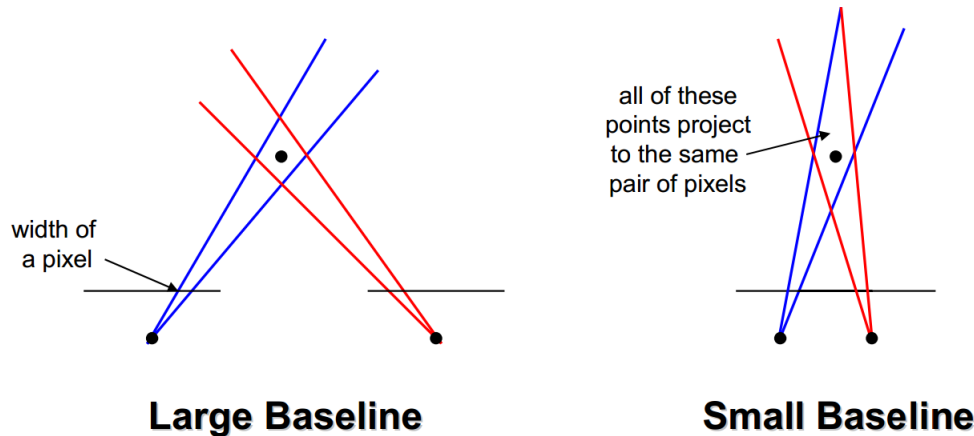


Figura 5.4: Imagem demonstrativa do efeito da variação do *baseline* [56].

No que diz respeito à relação entre o tipo de padrão utilizado e o erro obtido, e tendo em conta os valores do RMSE obtidos, este não parece ter uma influência muito significativa, havendo contudo uma ligeira tendência para uma maior dispersão do erro nas reconstruções de provetes marcados com padrões quadriculados em configurações de *baseline* curto, isto no caso dos provetes esférico e piramidal.

Pôde-se ainda constatar que os valores de RMSE associados aos modelos dos provetes de geometria piramidal, bem como os seus valores do erro médio e desvio padrão, apresentam magnitudes significativamente inferiores àqueles obtidos para os restantes provetes. Este é um indicador de que, para além do *baseline*, a própria morfologia da superfície a reconstruir também pode ser um fator determinante na qualidade do resultado obtido. É possível que a qualidade superior dos modelos piramidais obtidos, se prenda com o menor declive das superfícies conformadas dos provetes que os originaram, comparativamente aos provetes esférico e cónico, que apresentam superfícies de inclinação mais acentuada. Além disso, a menor magnitude das deformações sofridas pelos provetes piramidais resulta numa melhor visibilidade e menor distorção dos padrões marcados sobre as suas superfícies, comparativamente aos provetes esféricos e cónicos, em que o elevado grau de deformação sofrido em certas zonas pode causar um esbatimento do padrão, podendo isso ter consequências ao nível da quantidade e qualidade da informação adquirida na fase de binarização adaptativa. Seria no entanto necessário um estudo mais aprofundado, e abrangendo um maior número de amostras para poder confirmar esta tendência.

Para ter uma ideia mais clara da qualidade dos modelos obtidos nas várias condições, selecionou-se um limite de erro de 0.5 mm e foi contabilizada, para todos os modelos, a percentagem aproximada de pontos cujo erro está contido no intervalo  $[-0.5, 0.5]$  mm. Estes valores percentuais estão expostos na tabela 5.3.

É de destacar a qualidade superior dos resultados relativos aos provetes piramidais associados aos *baselines* intermédio e longo, respectivamente com 97.8% e 100% dos

Tabela 5.3: Valores da percentagem de pontos cujo erro se encontra contido num intervalo  $[-0.5,0.5]$  mm, isto para todos os modelos constituídos por elementos triangulares.

| Provete   | Padrão       | Baseline | %     |
|-----------|--------------|----------|-------|
| Esférico  | Pontos       | Curto    | 72.9  |
|           |              | Interm.  | 76.3  |
|           |              | Longo    | 92.6  |
|           | Quadriculado | Curto    | 63.5  |
|           |              | Interm.  | 82.2  |
|           |              | Longo    | 84.5  |
| Piramidal | Pontos       | Curto    | 95.6  |
|           |              | Interm.  | 97.8  |
|           |              | Longo    | 100   |
|           | Quadriculado | Curto    | 87.7  |
|           |              | Interm.  | 97.8  |
|           |              | Longo    | 100   |
| Cónico    | Pontos       | Curto    | 74.2  |
|           |              | Interm.  | 78.2  |
|           |              | Longo    | _____ |
|           | Quadriculado | Curto    | 80.8  |
|           |              | Interm.  | _____ |
|           |              | Longo    | _____ |

pontos apresentando um erro inferior a 0.5 mm, independentemente do tipo de padrão marcado. Adicionalmente, pôde-se apurar que para os casos particulares dos provetes piramidais obtidos recorrendo a uma configuração de *baseline* longo, as percentagens de pontos cujo erro se encontra contido num intervalo mais estreito de  $[-0.25,0.25]$ mm é de 91.7% e 95.5%, respectivamente correspondentes aos provetes marcados com o padrão de pontos e quadriculado.

## 5.2 Deformações

Nesta secção apresentam-se os resultados do cálculo das deformações obtidas recorrendo às reconstruções de melhor qualidade, isto para cada uma das geometrias, e de acordo com os valores de RMSE obtidos. Assim, são expostos os resultados relativos ao provete esférico marcado com padrão de pontos e obtido recorrendo ao *baseline* longo (Fig. 5.5), e aos provetes piramidal e cónico (Fig. 5.6 e Fig. 5.7), ambos marcados com o padrão de pontos, e reconstruídos recorrendo respectivamente ao *baseline* longo e intermédio. Dados os vários tipos de deformações determinadas, optou-se somente pela exposição dos resultados referentes à distribuição das deformações principais máximas, tendo os mapas de cores relativos aos restantes tipos de deformações sido remetidos para o anexo A.3, Fig. A.3 a Fig. A.8.

Como foi explicado na secção 4.2, o primeiro passo no cálculo das deformações foi a obtenção das deformações elementares, a partir das quais são posteriormente calculados os três tipos de deformações nodais. Estas últimas permitem uma visualização com transições de cor mais suaves e por isso considerou-se preferencial a sua exposição. De

entre estas, seleccionaram-se os resultados referentes às deformações nodais calculadas através da estratégia que recorre ao cálculo de uma média ponderada com dois pesos distintos (Fig. 4.6 (a)). Por permitir igualmente a obtenção de mapas de cores com transições mais graduais, escolheu-se expor os resultados obtidos recorrendo à função de interpolação descrita em 4.2. Os vários mapas de cores que se seguem (Fig. 5.5 a Fig. 5.7) representam os resultados fruto da interpolação dos valores originais das deformações nodais seleccionadas para uma grelha de pontos com espaçamento de 2 mm.

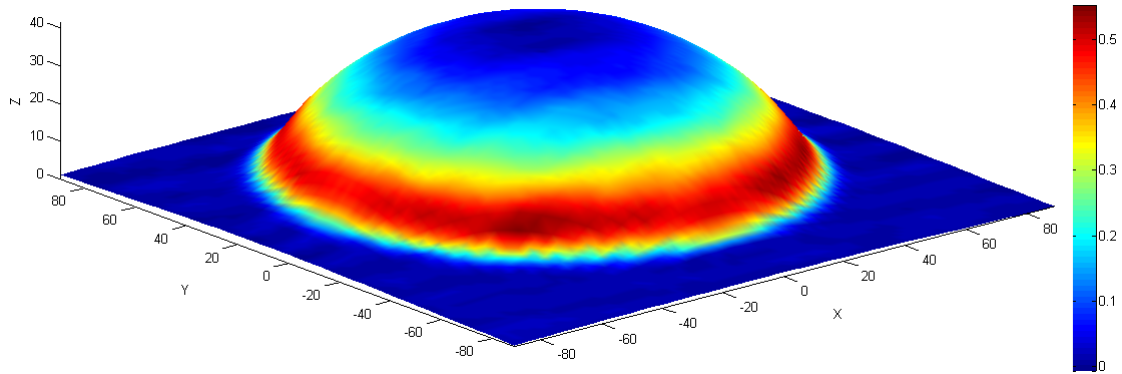


Figura 5.5: Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete esférico.

Diferentes figuras possuem diferentes escalas de cor, de acordo com os respectivos valores de deformação máximos e mínimos.

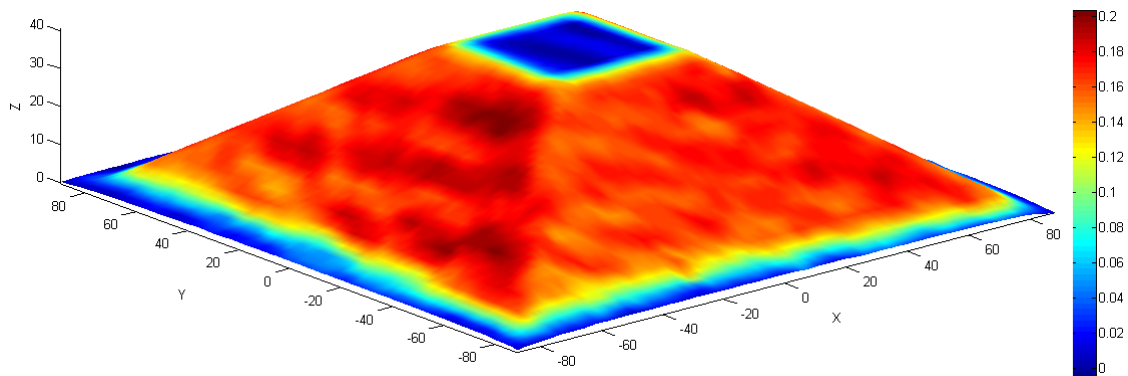


Figura 5.6: Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete piramidal.

Analisando os vários mapas de cores, é possível concluir que o provete cónico foi aquele que sofreu um maior grau de deformação, apresentando deformações principais máximas na ordem dos 75%. Já para os provetes esférico e piramidal foram obtidos valores de deformação principal máxima de aproximadamente 55 % e 20% respectivamente.

Verifica-se também que tanto no caso do provete piramidal como do cónico, a deformação tende a ser aproximadamente constante e próxima do valor máximo ao longo das regiões deformadas, sendo que as zonas de transição entre as regiões deformadas e as regiões não deformadas são relativamente curtas. Já no caso do provete esférico, os

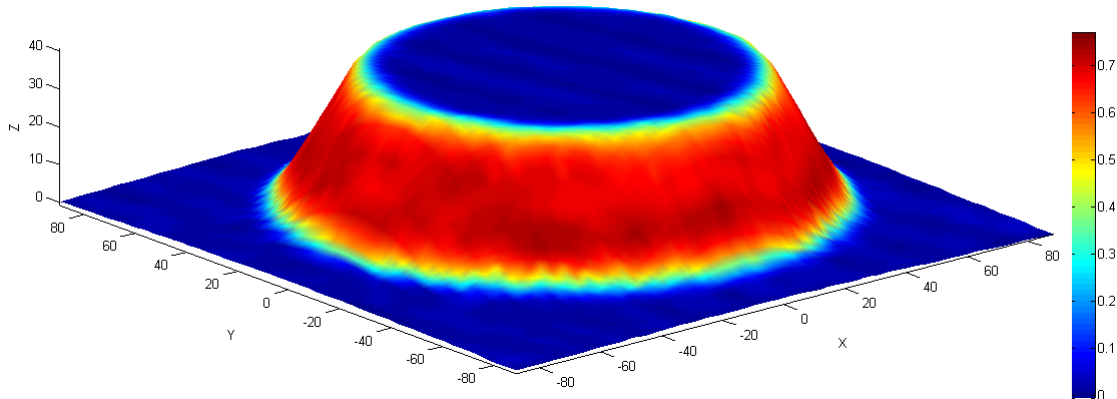


Figura 5.7: Distribuição das deformações principais máximas ao longo da superfície de um provete cônico.

valores de deformação principal máxima atingem o seu máximo nas regiões deformadas situadas perto da base do provete, havendo uma gradual diminuição da deformação à medida que nos aproximamos do topo da cúpula, região onde esta volta a ter valores próximos de 0.

Para ter uma percepção diferente do modo como as deformações ocorrem nas superfícies dos vários provetes, pode-se recorrer à observação dos respetivos histogramas (Fig. 5.8), bem como dos diagramas que expressam a relação entre as deformações principais mínimas e máximas associadas a cada nó (Fig. 5.9 e Fig. 5.10).

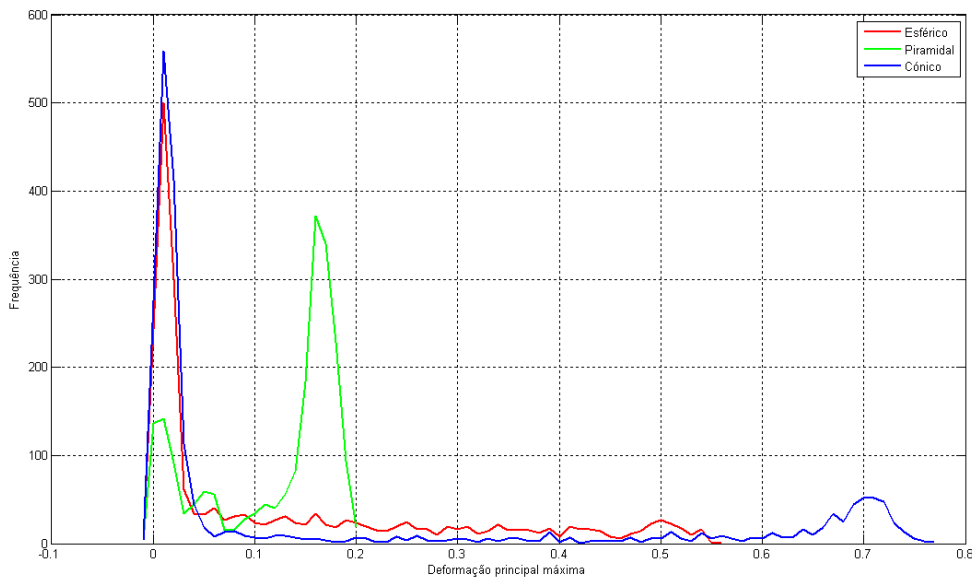
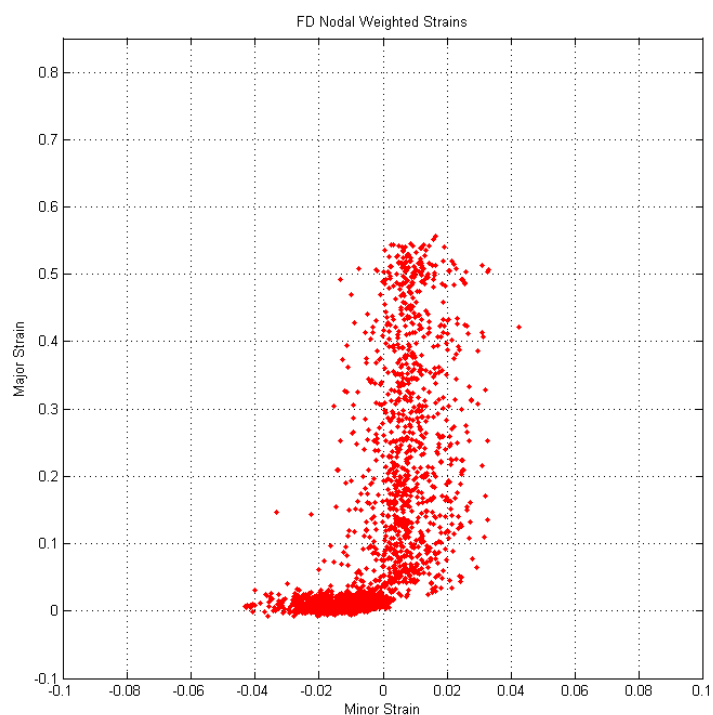
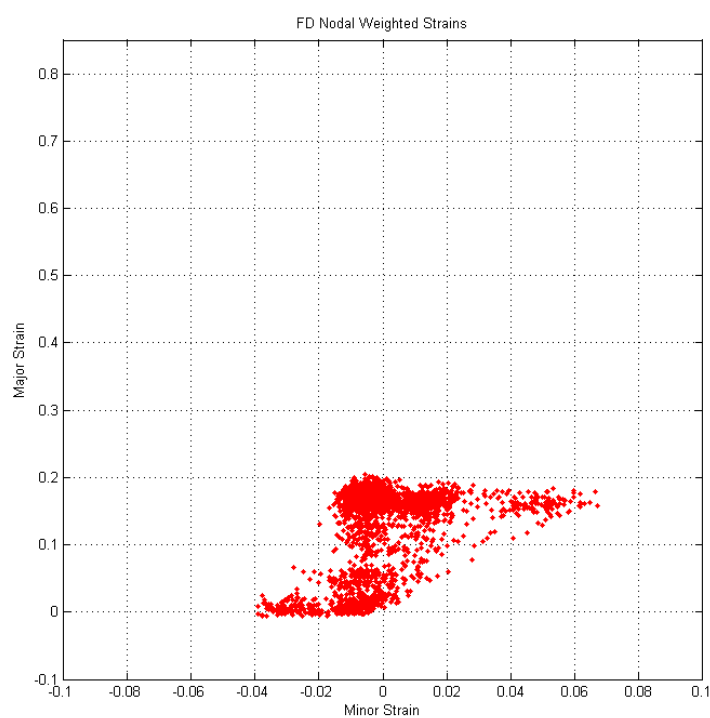


Figura 5.8: Diagramas de frequência referentes à distribuição do número de nós pelos vários valores de deformação nodal e para os três provetes selecionados. A vermelho verde e azul estão representadas as curvas associadas aos provetes esférico, piramidal e cónico respectivamente.





(a)



(b)

Figura 5.9: Diagrama que representa a relação entre as deformações principais mínimas e máximas para cada nó, relativo ao provete esférico (a) e ao provete piramidal (b).

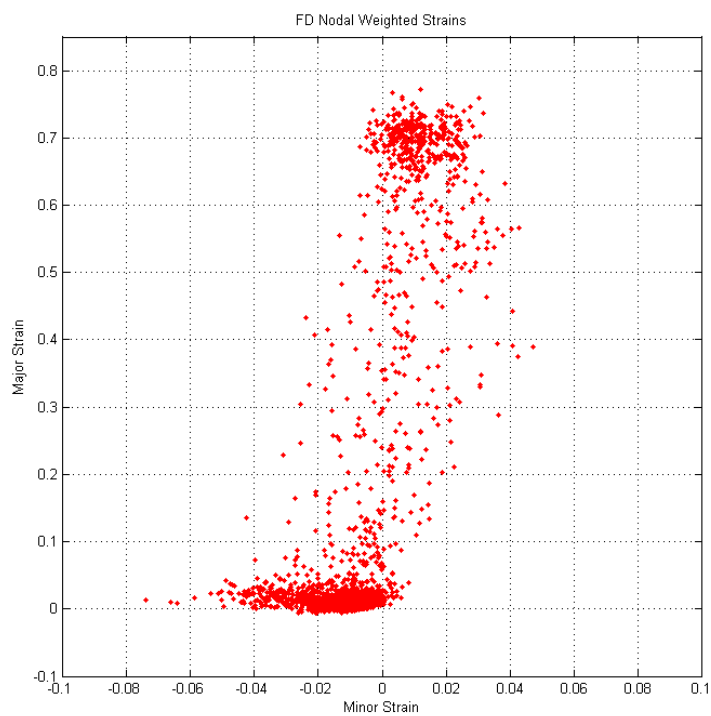


Figura 5.10: Diagrama que representa a relação entre as deformações principais mínimas e máximas para cada nó, relativo ao provete cónico.

### 5.3 Problemas e Limitações

Durante o decorrer da metodologia identificaram-se alguns problemas que impossibilitaram a obtenção de 3 dos 18 modelos pretendidos, todos eles referentes aos provetes de geometria cônica. Na Fig. 5.11, imagens (a) e (b), é possível observar as imagens retificadas de um provete cônico, adquiridas respectivamente pela câmera esquerda e pela câmera direita, na configuração de *baseline* longo. Pode-se constatar que em ambas as imagens a existência de uma zona onde a densidade do padrão de pontos sobe consideravelmente. Este efeito é uma consequência da elevada inclinação das paredes do provete cônico, aliada ao *baseline* longo utilizado, e pode ser mais facilmente observado na Fig. 5.11 (c), relativa a uma secção da Fig. 5.11(a). A sua ocorrência representa um problema na fase de reconstrução dos pontos em falta, uma vez que as várias faixas originadas pelo processo de dilatação tendem a unir-se nas zonas onde ele ocorre (Fig. 5.11 (c)), impossibilitando a correta determinação da posição dos pontos ausentes, e inviabilizando assim a sua correspondência pelo método descrito em 3.5.6.

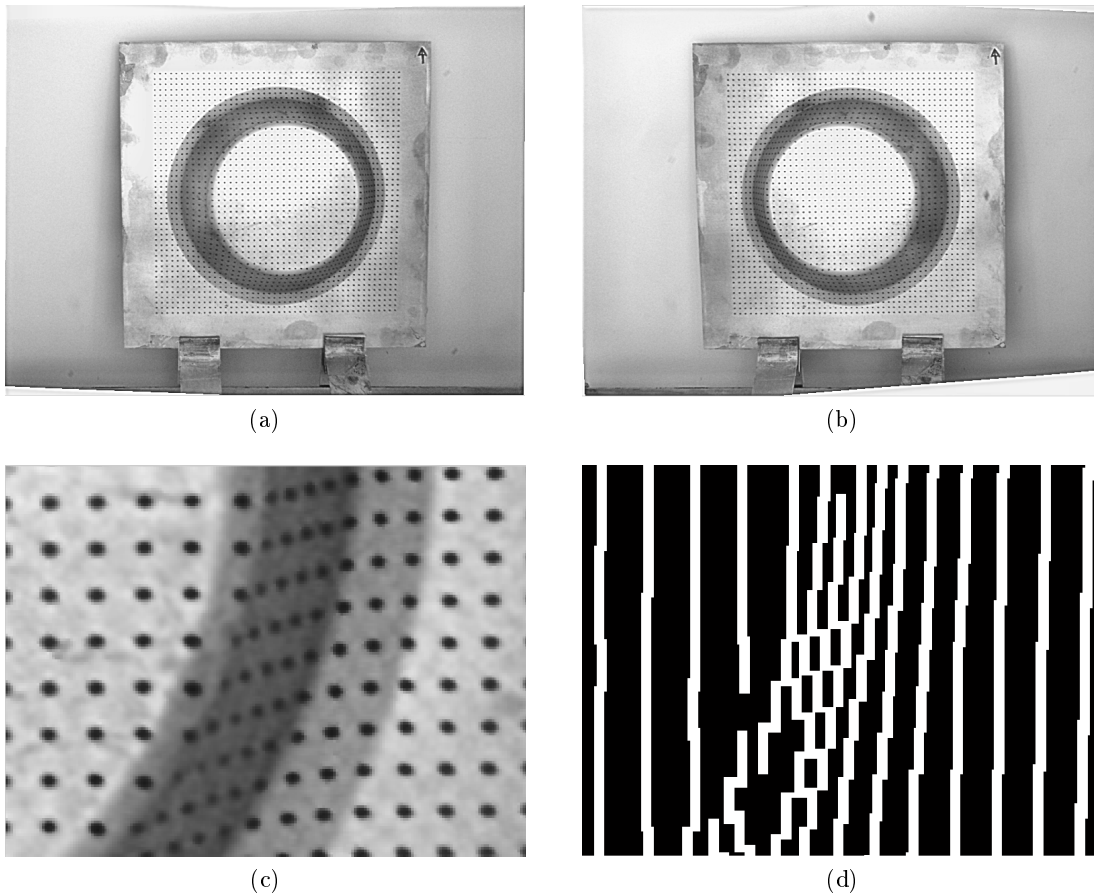


Figura 5.11: Em (a) e (b) observa-se um par estéreo retificado obtido recorrendo a uma configuração de *baseline* longo, e relativo a um provete cônico. Em (c) está representada uma secção da imagem (a) onde é visível o aumento da densidade dos pontos numa região, e em (d) pode-se observar o problema causado por este efeito durante a fase de reconstrução dos pontos em falta.

A ocorrência deste problema era expectável, dado que se adotou uma metodologia apoiada na obtenção de um modelo tridimensional recorrendo a um único par estéreo, adquirido por dois sensores estáticos. Assim, é importante ter em conta a geometria do provete que se pretende estudar, não sendo a técnica utilizada apropriada para a medição de superfícies com variações de inclinação demasiado acentuadas, dada a propensão para a ocorrência do problema acima descrito, ou até do fenómeno de oclusão de regiões. É portanto necessário ter em conta que o aumento do *baseline* pode nem sempre ser a estratégia mais adequada ao estudo de provetes com determinadas morfologias, podendo este ter de ser eventualmente reduzido, a custo de não ser possível obter o modelo tridimensional desejado, sacrificando contudo a qualidade dos resultados obtidos.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

A visão estéreo, aliada ao uso de padrões de características geométricas conhecidas, revelou-se uma opção interessante para a análise do modo como ocorrem os vários tipos de deformações numa superfície conformada, permitindo assim a obtenção de várias informações potencialmente relevantes para o estudo e melhoria dos processos de conformação. Esta revela-se uma possível alternativa ao uso de técnicas que envolvam processos de medição mais morosos ou mais exigentes do ponto de vista técnico. É no entanto de frisar a importância de alguns aspetos a ter em conta no sentido de obter resultados de boa qualidade, nomeadamente o controlo das condições de iluminação e a correta realização do procedimento de calibração das câmaras.

A estratégia de correspondência estéreo desenvolvida revelou-se eficiente, desde que devidamente acompanhada pela utilização prévia da técnica adotada para a interpolação das coordenadas de eventuais elementos do padrão em falta. Esta última revelou-se uma forma interessante de colmatar a potencial perda de informação ocorrida durante o processamento das imagens.

No geral, a metodologia estéreo aplicada permitiu a obtenção de resultados fiáveis a nível geométrico, como foi possível concluir recorrendo a uma técnica de validação apoiada no uso de uma máquina de medição de coordenadas. O estudo da influência dos parâmetros estéreo permitiu ter uma ideia da qualidade dos modelos passíveis de obter através do uso desta técnica aliada à metodologia descrita na dissertação, com valores de erro RMS na ordem das décimas de milímetro, e permitiu ainda ter a percepção dos limites e condicionantes da sua aplicação. É de realçar no entanto que a qualidade dos resultados não se encontra limitada à verificada no decorrer deste trabalho, existindo a possibilidade de obter resultados superiores com a utilização desta ou semelhantes metodologias, desde que postas em prática algumas alterações, como por exemplo a utilização de processos de marcação de chapa mais adequados e de sensores óticos com resoluções mais elevadas. Um aumento da dita resolução tornará possível a utilização de padrões constituídos por malhas menos grosseiras, permitindo assim obter modelos tridimensionais mais fiéis às respetivas superfícies, e a consequente obtenção de valores de deformação mais próximos dos verificados na realidade.

Relativamente aos dois tipos de padrões utilizados, de pontos e de quadriculas, e de acordo com a técnica de validação utilizada, ambos produziram resultados semelhantes, originando modelos tridimensionais com valores de erro RMS pouco díspares, embora

do ponto de vista qualitativo pareça haver uma ligeira superioridade na qualidade dos modelos obtidos recorrendo a padrões de pontos.

No que diz respeito ao cálculo das deformações, e do ponto de vista qualitativo, os resultados observados nos mapas de cores tridimensionais vão de encontro ao que seria de esperar. Contudo, e apesar da metodologia utilizada na aferição da qualidade dos dados, não foi possível estabelecer qual a exatidão dos valores de deformação obtidos, sendo que para tal seria necessário a comparação da informação obtida com dados adquiridos por meio de outras técnicas experimentais, como é por exemplo o caso da correlação digital de imagens ou da extensometria.

## 6.2 Trabalho Futuro

Com esta dissertação concluiu-se que a visão estéreo é uma área bastante vasta, com uma panóplia de aplicações também ela bastante alargada. Um dos seus problemas centrais continua a ser a resolução da correspondência, tema esse que continua a receber atenção por parte de inúmeros investigadores. Assim, é do interesse futuro o estudo de novas técnicas para a resolução deste problema, no sentido de alcançar soluções mais robustas e versáteis do que aquela utilizada no decorrer deste trabalho. Outro passo a considerar, é a utilização de uma metodologia apoiada em processos de calibração automática, permitindo assim a aquisição de múltiplas imagens ao redor de todo o provete, resultando num atenuar dos problemas referidos na secção 5.3, e possibilitando assim o estudo de provetes conformados com geometrias mais elaboradas.

A metodologia utilizada permitiu alcançar resultados considerados satisfatórios. No entanto, e apesar da velocidade de processamento não ter sido alvo de estudo no decorrer desta dissertação, é de notar a importância de estudar e explorar novos métodos que permitam a obtenção de resultados em períodos de tempo cada vez mais reduzidos. Nesse sentido, é essencial a continuação do estudo de novos métodos mais eficientes de obtenção de coordenadas bidimensionais relativas a padrões geométricos característicos, como é o caso do padrão de pontos e do padrão quadriculado utilizados. Ainda nesse sentido, seria interessante a aplicação da metodologia seguida utilizando linguagens de programação compiladas e mais amplamente usadas na concepção de aplicações de *software*, como por exemplo C ou C++.

Por fim, seria interessante a realização de um estudo comparativo entre os resultados obtidos seguindo uma metodologia estéreo deste tipo e resultados provenientes de processos de simulação numérica ou até de outras metodologias experimentais.

# Referências

- [1] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno, “A low cost 3D scanner based on structured light,” *Computer Graphics Forum*, vol. 20, pp. 299–308, Sept. 2001.
- [2] G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, “State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 9, pp. 568–601, Jan. 2009.
- [3] G. Bianco, A. Gallo, F. Bruno, and M. Muzzupappa, “A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 13, pp. 11007–31, Jan. 2013.
- [4] T. Moons, L. V. Gool, and M. Vergauwen, *3d Reconstruction from Multiple Images: Part 1: Principles*, vol. 4. 2009.
- [5] Qubic, “ROLAND PICZA LPX-1200 3D Laser Scanner.” [http://www.qubic.com.au/roland\\_lpx1200.htm](http://www.qubic.com.au/roland_lpx1200.htm), 2014.
- [6] G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, and C. Chamzas, “Methods for 3D digitization of Cultural Heritage,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 93–98, Jan. 2007.
- [7] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, “Pattern codification strategies in structured light systems,” *Pattern Recognition*, vol. 37, pp. 827–849, Apr. 2004.
- [8] D. L. Gabriel Taubin, “Assignment 2: Structured Lighting for 3D Scanning.” <http://mesh.brown.edu/3dpgp-2009/homework/hw2/hw2.html>, 2014.
- [9] A. Kolb, E. Barth, R. Koch, and R. Larsen, “Time of flight Cameras in Computer Graphics,” *Computer Graphics Forum*, vol. xx, pp. 1–18, 2010.
- [10] velodyne, “velodyne - HDL-64E LiDAR sensor.” <http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/hdl64e.aspx>, 2014.
- [11] Y. Li, H.-Y. Shum, C.-K. Tang, and R. Szeliski, “Stereo reconstruction from multi-perspective panoramas,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 26, pp. 45–62, Jan. 2004.
- [12] PointGrey, “Bumblebee XB3.” <http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-xb3>, 2014.

- [13] R. Andolfato, J. Camacho, and G. Brito, “Extensometria básica,” tech. rep., Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.
- [14] L. L. of Optics and E. Mechanics, “Experimental Techniques to Bio-Mechanic Applications.” [http://paginas.fe.up.pt/~inegi/lome/R\\_D/Biomechanics.htm](http://paginas.fe.up.pt/~inegi/lome/R_D/Biomechanics.htm), 2014.
- [15] D. Roylance, “Experimental Strain Analysis,” tech. rep., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.
- [16] C. Walker, “Moiré Interferometry for Strain Analysis,” in *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 8, pp. 213–262, Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1988.
- [17] R. R. U. T. C. in Solid Mechanics associated with OCAMAC, “Automated Moire interferometry for strain analysis.” <http://www.ocamac.ox.ac.uk/newsletters/Newsletter%203/StrainAnalysis.html>, 2014.
- [18] H. Liu and C. Basaran, “Application of moire interferometry to determine strain fields and debonding of solder joints in BGA packages,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 27, no. 1, pp. 217–223, 2004.
- [19] D. Kennedy, “Application of ESPI-method for strain analysis in thin wall cylinders,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, pp. 585–594, Mar. 2004.
- [20] W. Boesemann, R. Godding, H. Huette, M. Forming, M. Tools, W. Group, and K. E. Y. Words, “Photometric Measurement Techniques for Quality Control in Sheet Metal Forming,” vol. XXXIII, pp. 48–55, 2000.
- [21] A. Spence and H. Chan, “Automotive sheet metal and grid digitizing solutions,” *Computer-Aided Design & Applications*, vol. 2, pp. 135–144, Jan. 2005.
- [22] R. Sowerby, J. Duncan, and E. Chu, “The modelling of sheet metal stampings,” *International journal of mechanical science*, vol. 28, no. 7, pp. 415–430, 1986.
- [23] G. O. M. Techniques, “Material Properties: Determination of Process Limitations in Sheet Metal Forming - Forming Limit Diagram.” [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/flc\\_fld\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf), 2014.
- [24] D. Dynamics, “Q-400 - Error Estimations of 3D Image Correlation Measurements.” <http://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/dic/T-Q-400-Accuracy-3DCORR-003-EN.pdf>, 2014.
- [25] G. O. M. Techniques, “Modern measuring tools in stamping applications for complex and simple parts.” [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/stamping\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/stamping_EN.pdf), 2014.
- [26] F. Breu, S. Guggenbichler, and J. Wollmann, “Optical strain measurement on a DAF truck bumper,” *Vasa*, no. December, 2008.
- [27] G. O. M. Techniques, “ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis.” [http://www.spectromas.ro/assets/1276243727\\_ARAMIS\\_EN.pdf](http://www.spectromas.ro/assets/1276243727_ARAMIS_EN.pdf), 2014.



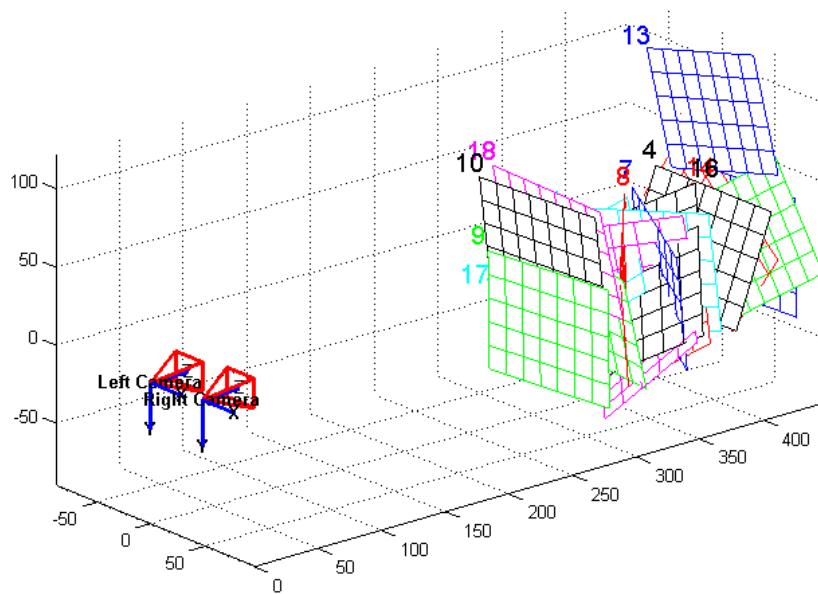
- [28] G. O. M. Techniques, “ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis.” <http://www.gom.com/news/history/single/article/new-aramis-pontos-12m-and-hs-sensors-available.html>, 2014.
- [29] F. Ozturk and M. Dilmeç, “Grid marking and measurement methods for sheet metal formability,” *5th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS*, no. June, 2009.
- [30] J. Torrão, “Control and execution of incremental forming using parallel kinematics,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2013.
- [31] T. Dalsa, “Genie M1600.” <http://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/area-scan/genie/CR-GEN0-M160X/>, 2014.
- [32] O. I. Automation and C. S. Engineering, “Machine Vision: The key considerations for successful visual inspection.” <http://www.optimacs.com/wp-content/uploads/2012/03/Machine-vision-the-key-considerations.pdf>, 2014.
- [33] Banner, “Machine Vision Basics.” [http://info.bannersalesforce.com/cs/groups/public/documents/literature/mvb\\_wp.pdf](http://info.bannersalesforce.com/cs/groups/public/documents/literature/mvb_wp.pdf), 2014.
- [34] N. Instruments, “A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part I.” <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>, 2014.
- [35] J. Vilaça, J. Fonseca, and A. Pinho, “Stereo vision calibration procedure for 3D surface measurements,” *IEEE Industrial Electronics*, pp. 3508–3513, 2006.
- [36] J. Kannala, J. Heikkilä, and S. Brandt, “Geometric camera calibration,” *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, pp. 1–20, 2008.
- [37] J.-Y. Bouguet, “Camera Calibration Toolbox for Matlab.” [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/), 2014.
- [38] V. Nozick, “Multiple view image rectification,” *1st IEEE-International Symposium on Access Spaces (IEEE-ISAS’11)*, pp. 277–282, 2011.
- [39] C. Loop and Z. Zhang, “Computing rectifying homographies for stereo vision,” *Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 125–131, 1999.
- [40] Z. Zhang, “Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review,” *International journal of computer vision*, vol. 27, no. 2, pp. 161–198, 1998.
- [41] A. Fusiello, E. Trucco, and A. Verri, “A compact algorithm for rectification of stereo pairs,” *Machine Vision and Applications*, pp. 16–22, 2000.
- [42] B. Bozorgtabar, H. Azami, and F. Noorian, “Illumination invariant face recognition using fuzzy LDA and FFNN,” *Journal of Signal and Information Processing*, vol. 2012, no. February, pp. 45–50, 2012.
- [43] S. Saleh and H. Ibrahim, “Mathematical Equations for Homomorphic Filtering in Frequency Domain: A Literature Survey,” *International Conference on Information and Knowledge Management*, vol. 45, no. Icikm, pp. 74–77, 2012.

- [44] V. Struc, “The INface toolbox v2.0 for illumination invariant face recognition.” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26523-the-inface-toolbox-v2-0-for-illumination-invariant-face-recognition>, 2014.
- [45] Y. Jin, L. Fayad, and A. Laine, “Contrast enhancement by multiscale adaptive histogram equalization,” *Wavelets: Applications in Signal and Image Processing IX*, vol. 4478, pp. 206–213, 2001.
- [46] D. Bradley and G. Roth, “Adaptive thresholding using the integral image,” *Journal of graphics, gpu, and game tools*, 2007.
- [47] J. Motl, “Bradley Local Image Thresholding.” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40854-bradley-local-image-thresholding>, 2014.
- [48] R. Gupta and S. Cho, “Real-time stereo matching using adaptive binary window,” *Proc. 3DPVT, Session*, 2010.
- [49] P. Vellanki and M. Khambete, “Enhanced Stereo Matching Technique using Image Gradient for Improved Search Time,” *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 3, pp. 483–486, 2011.
- [50] Y. Cao, “Hungarian Algorithm for Linear Assignment Problems (V2.3).” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20652-hungarian-algorithm-for-linear-assignment-problems--v2-3->, 2014.
- [51] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. 2008.
- [52] J. D’Errico, “Surface Fitting using gridfit.” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998-surface-fitting-using-gridfit>, 2014.
- [53] K. M. . G. L. Bill McDonald, Oliver Woodford, “stlwrite - Write binary or ascii STL file.” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20922-stlwrite-write-binary-or-ascii-stl-file>, 2014.
- [54] D. L. J.H. Vogel, “An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces,” *J. Materials Shaping Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 205–216, 1989.
- [55] A. T. LLC, “ASAME Reference Manual.” <http://www.asametechnology.com/dwn/asame41.pdf>, 2014.
- [56] S. Seitz, “Computer Vision - multiview.” <https://courses.cs.washington.edu/courses/csep576/05wi/lectures/multiview.pdf>, 2014.

# Apêndice A

## Anexos

### A.1 Parâmetros extrínsecos obtidos com o processo de calibração das câmaras nas diferentes configurações estéreo

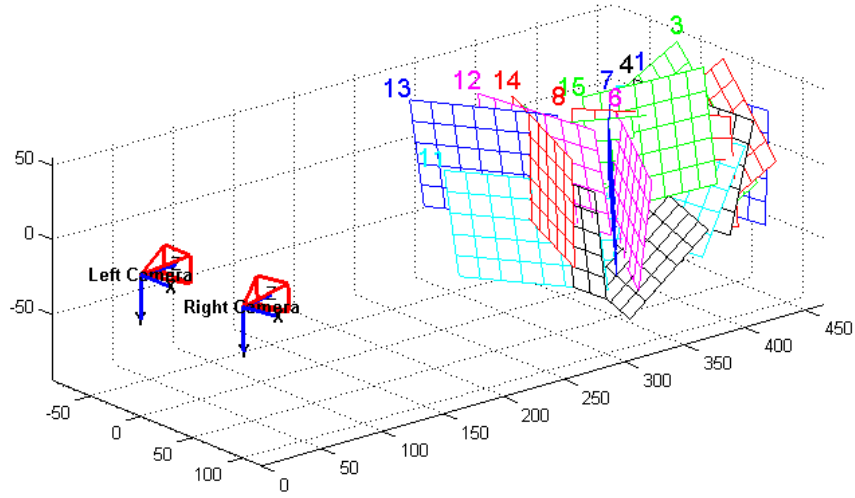


Parâmetros Extrínsecos - posição da câmara direita em relação à câmara esquerda:

Vector de Rotação:  $\text{om} = \begin{bmatrix} -0.01407 & 0.01025 & -0.00730 \end{bmatrix}$   
 $\pm \begin{bmatrix} 0.00148 & 0.00144 & 0.00008 \end{bmatrix}$

Vector de Translação:  $T = \begin{bmatrix} -45.36770 & 1.33676 & -2.29435 \end{bmatrix}$   
 $\pm \begin{bmatrix} 0.02328 & 0.02020 & 0.16039 \end{bmatrix}$

Figura A.1: Representação dos parâmetros extrínsecos em milímetros, relativos à configuração de *baseline* curto.

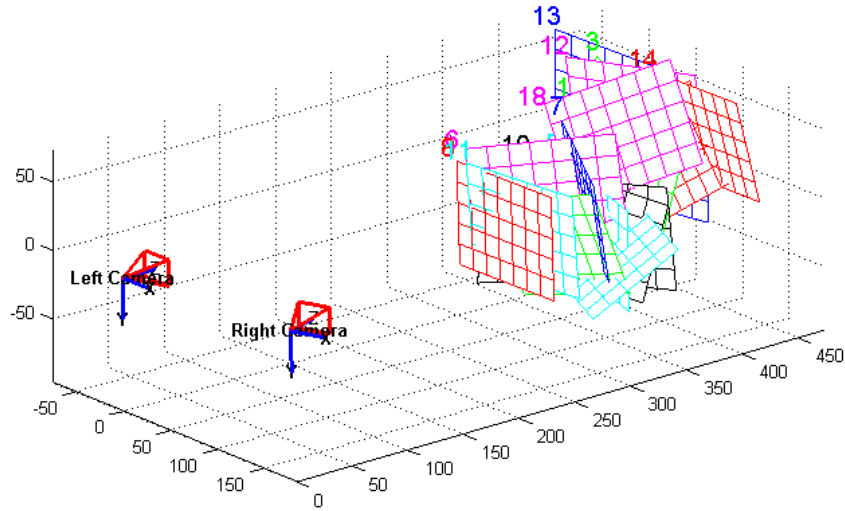


Parâmetros Extrínsecos - posição da câmara direita em relação à câmara esquerda:

Vector de Rotação:  $om = [-0.01264 \ 0.19465 \ 0.01594]$   
 $\pm [0.00134 \ 0.00161 \ 0.00021]$

Vector de Translação:  $T = [-89.77361 \ -0.33954 \ 8.65739]$   
 $\pm [0.03627 \ 0.02501 \ 0.20215]$

(a)



Parâmetros extrínsecos - posição da câmara direita em relação à câmara esquerda:

Vector de Rotação:  $om = [-0.01118 \ 0.29264 \ 0.02980]$   
 $\pm [0.00167 \ 0.00193 \ 0.00035]$

Vector de Translação:  $T = [-155.63111 \ -3.72107 \ 28.07736]$   
 $\pm [0.08063 \ 0.05377 \ 0.33508]$

(b)

Figura A.2: Representação dos parâmetros extrínsecos em milímetros, relativos à configuração de *baseline* intermédio (a) e de *baseline* longo (b).

## A.2 Resultados referentes às reconstruções dos restantes provetes

Tabela A.1: Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes piramidais marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de *baseline* curto, intermédio, e longo, correspondentes respectivamente à primeira, segunda e terceira linhas da tabela.

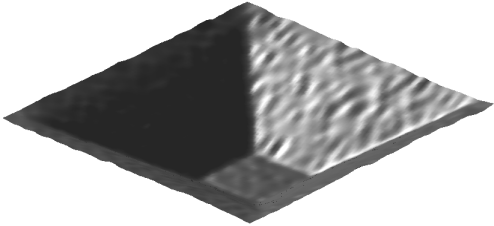
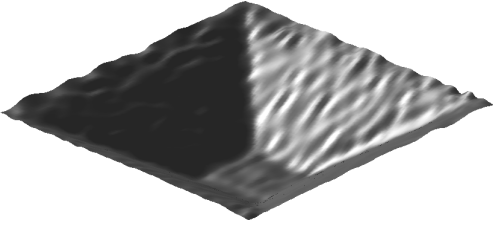
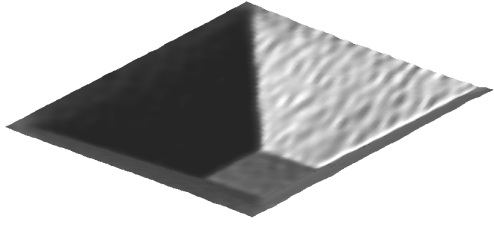
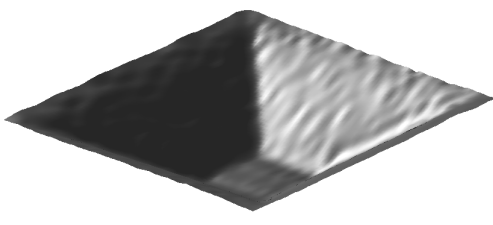
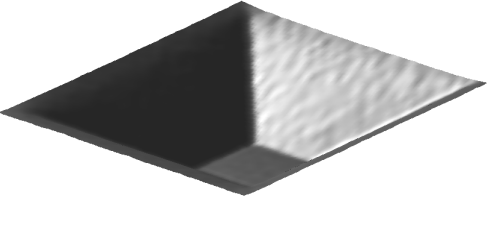
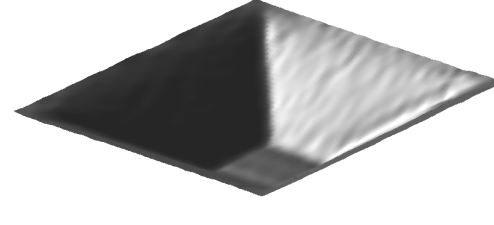
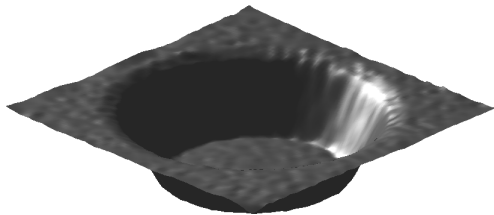
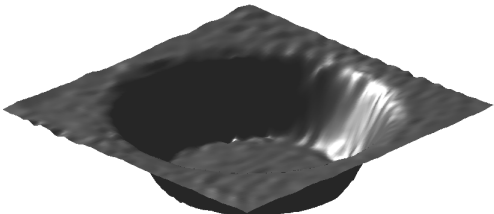
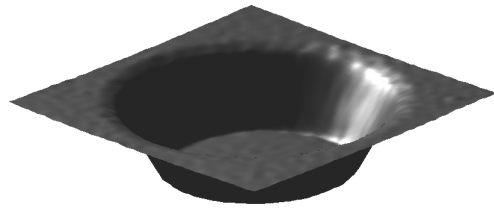
| Pontos  | Quadriculado   |
|---|--|
|    |    |
|   |   |
|  |  |

Tabela A.2: Na tabela observam-se as várias reconstruções obtidas para os provetes cónicos marcados com o padrão de pontos e com o padrão quadriculado, nas várias configurações de *baseline* curto e intermédio, correspondentes respectivamente à primeira e segunda linhas da tabela.

| Pontos  | Quadriculado   |
|---|--|
|  |  |
|  |  |

### A.3 Resultados referentes aos restantes tipos de deformações ocorridas nos modelos selecionados

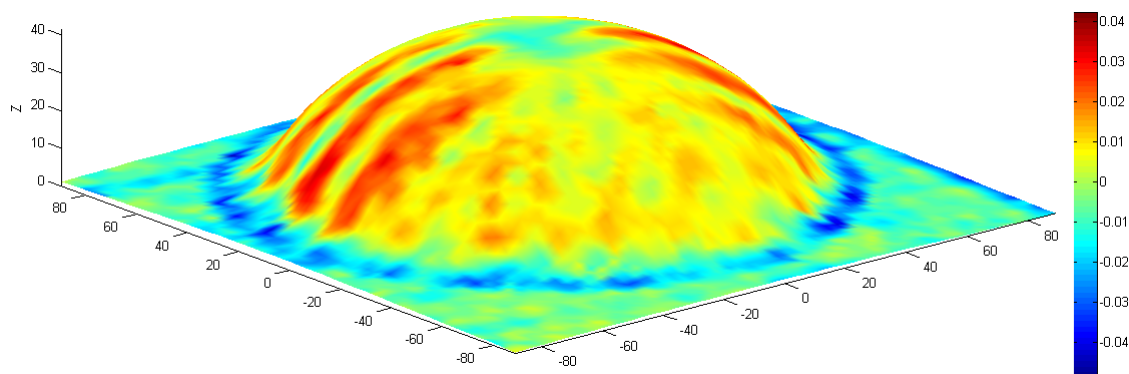


Figura A.3: Distribuição das deformações principais mínimas ao longo da superfície de um provete esférico.

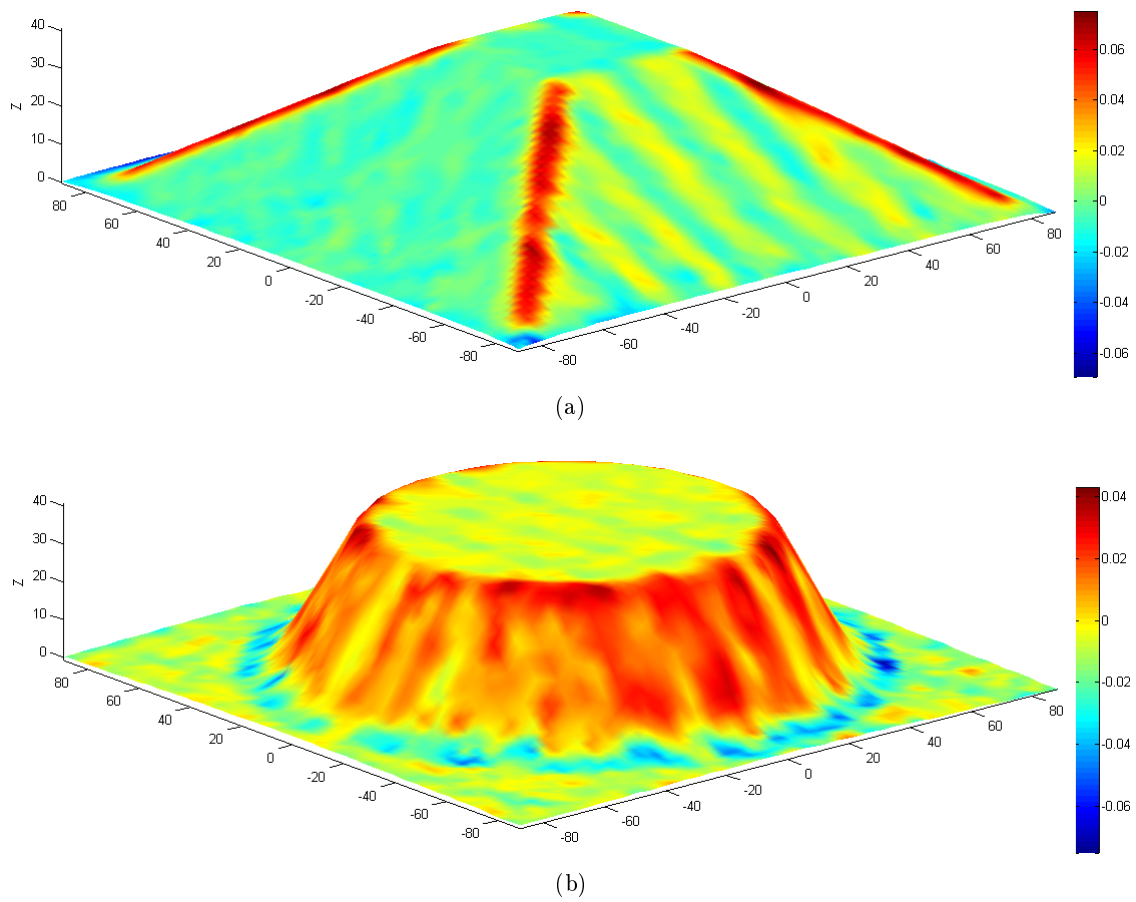


Figura A.4: Distribuição das deformações principais mínimas ao longo da superfície de um provete piramidal (a) e de um provete cônico (b).

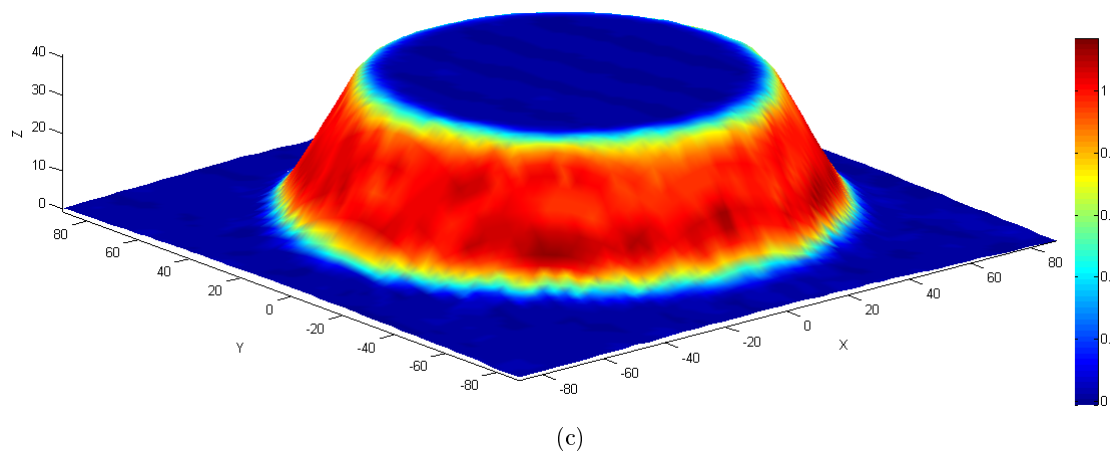
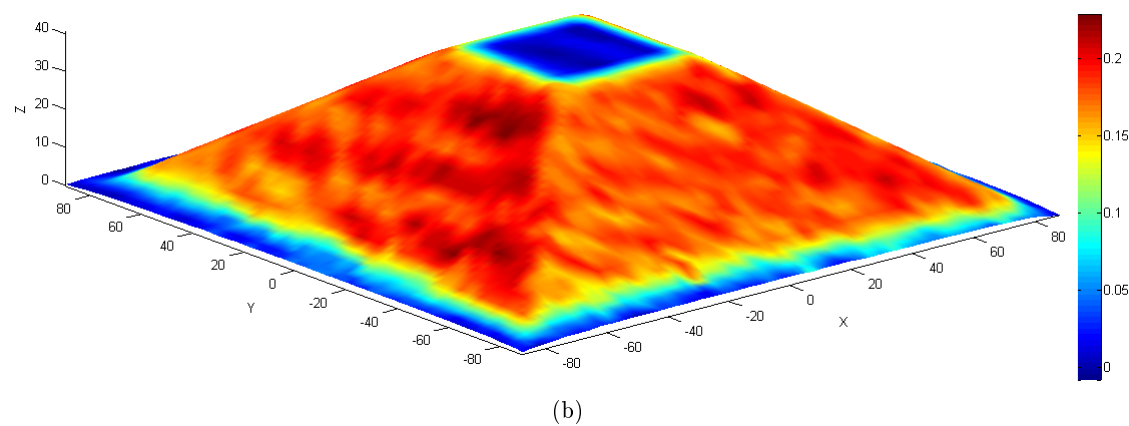
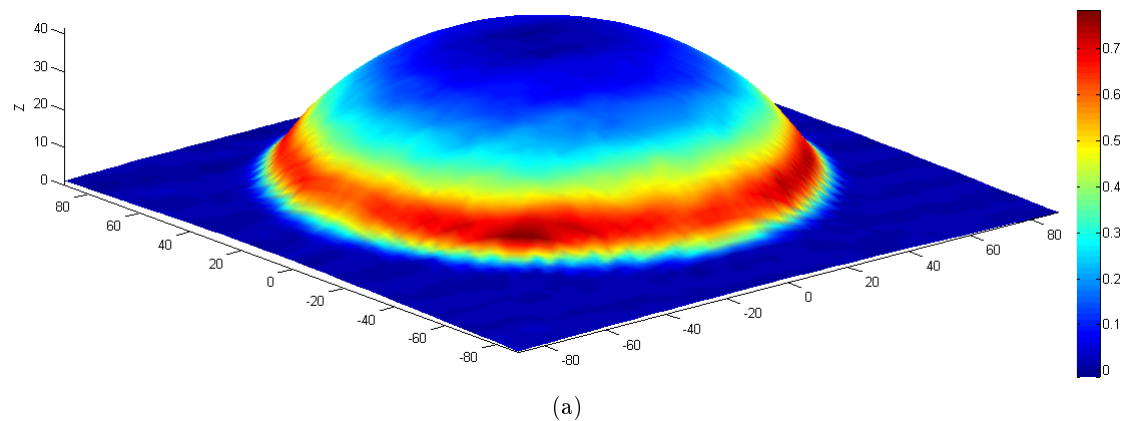


Figura A.5: Distribuição das deformações de engenharia máximas ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cônico (c).



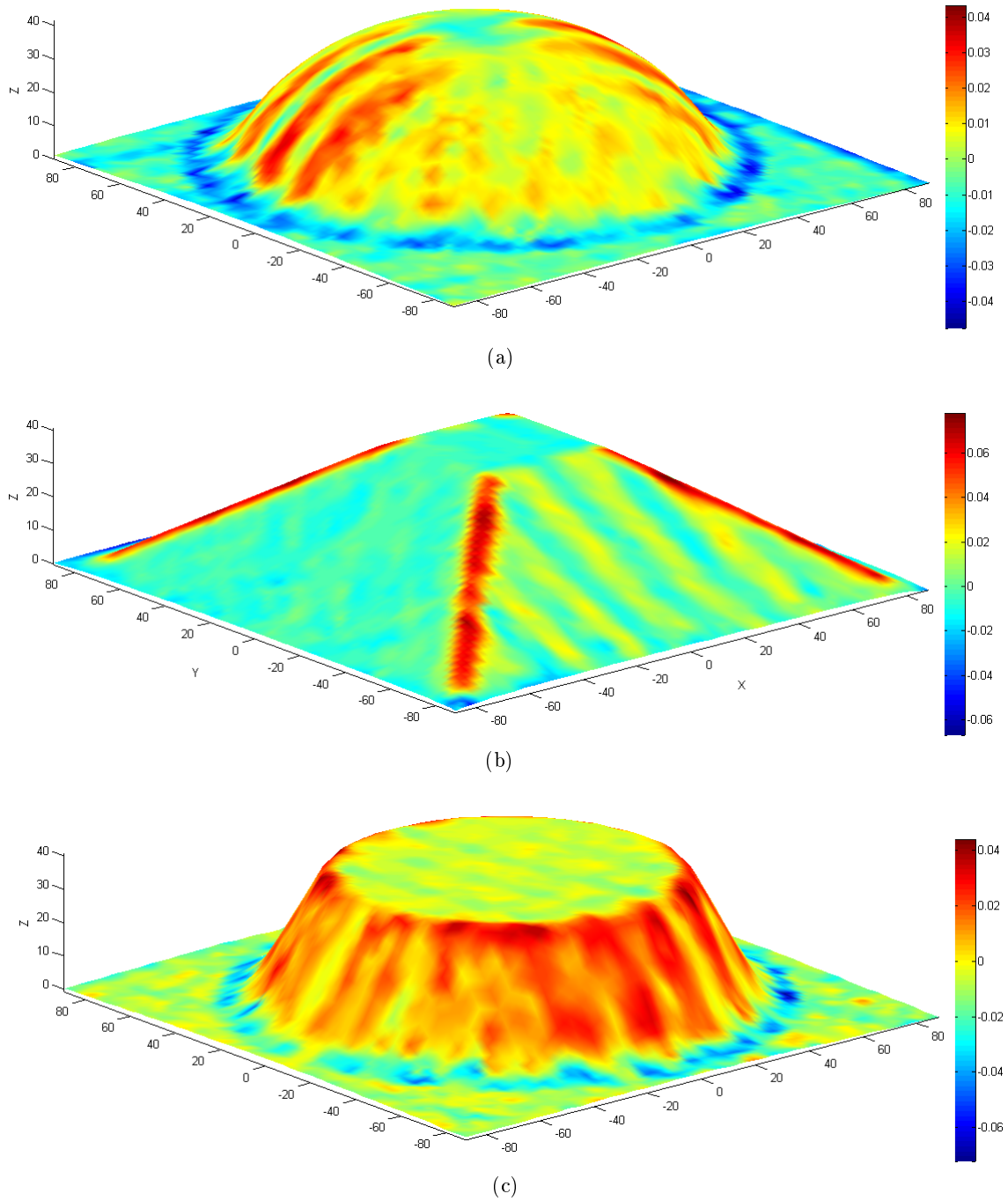


Figura A.6: Distribuição das deformações de engenharia mínimas ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cônico (c).

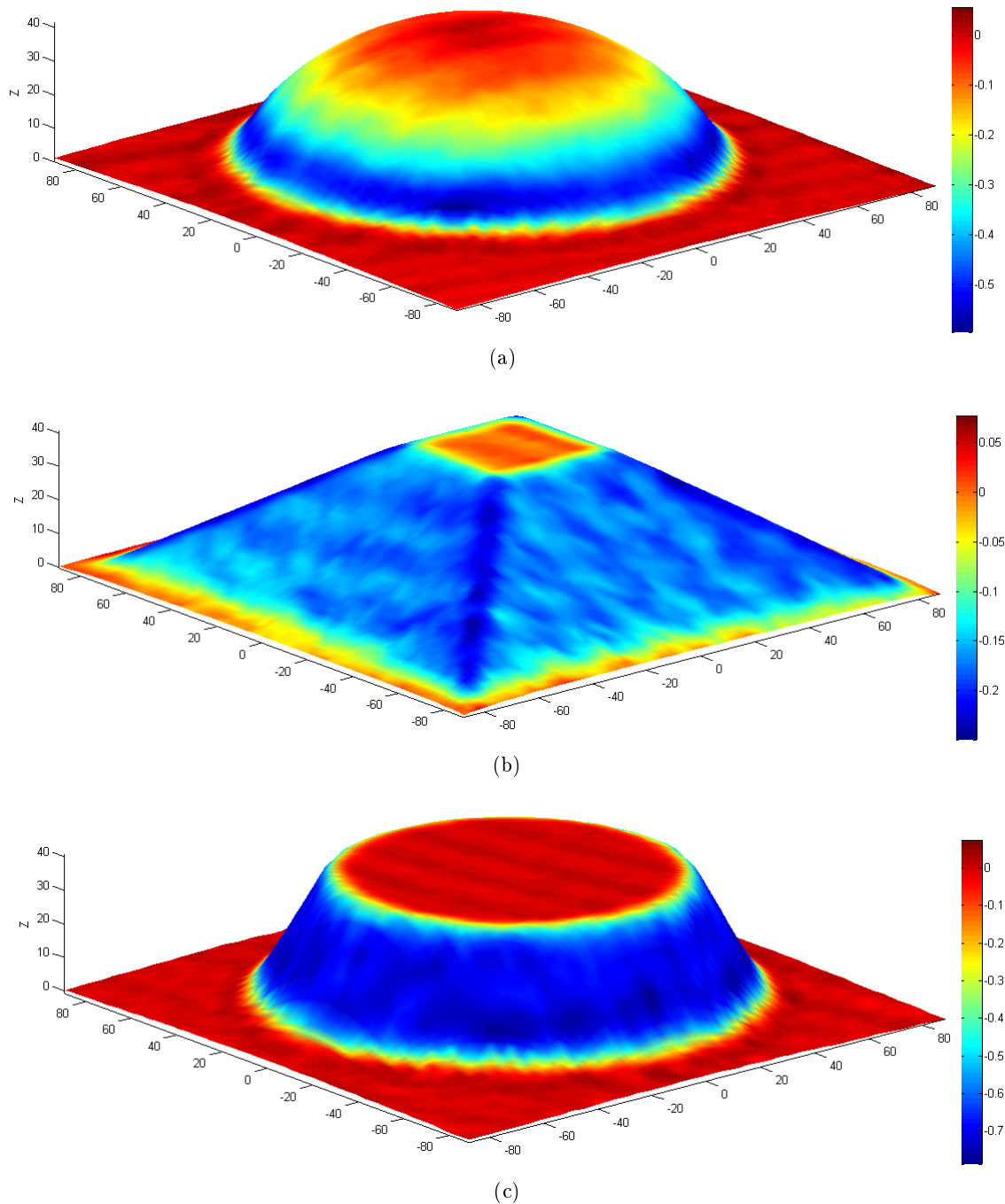


Figura A.7: Distribuição das deformações de espessura ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cônico (c).

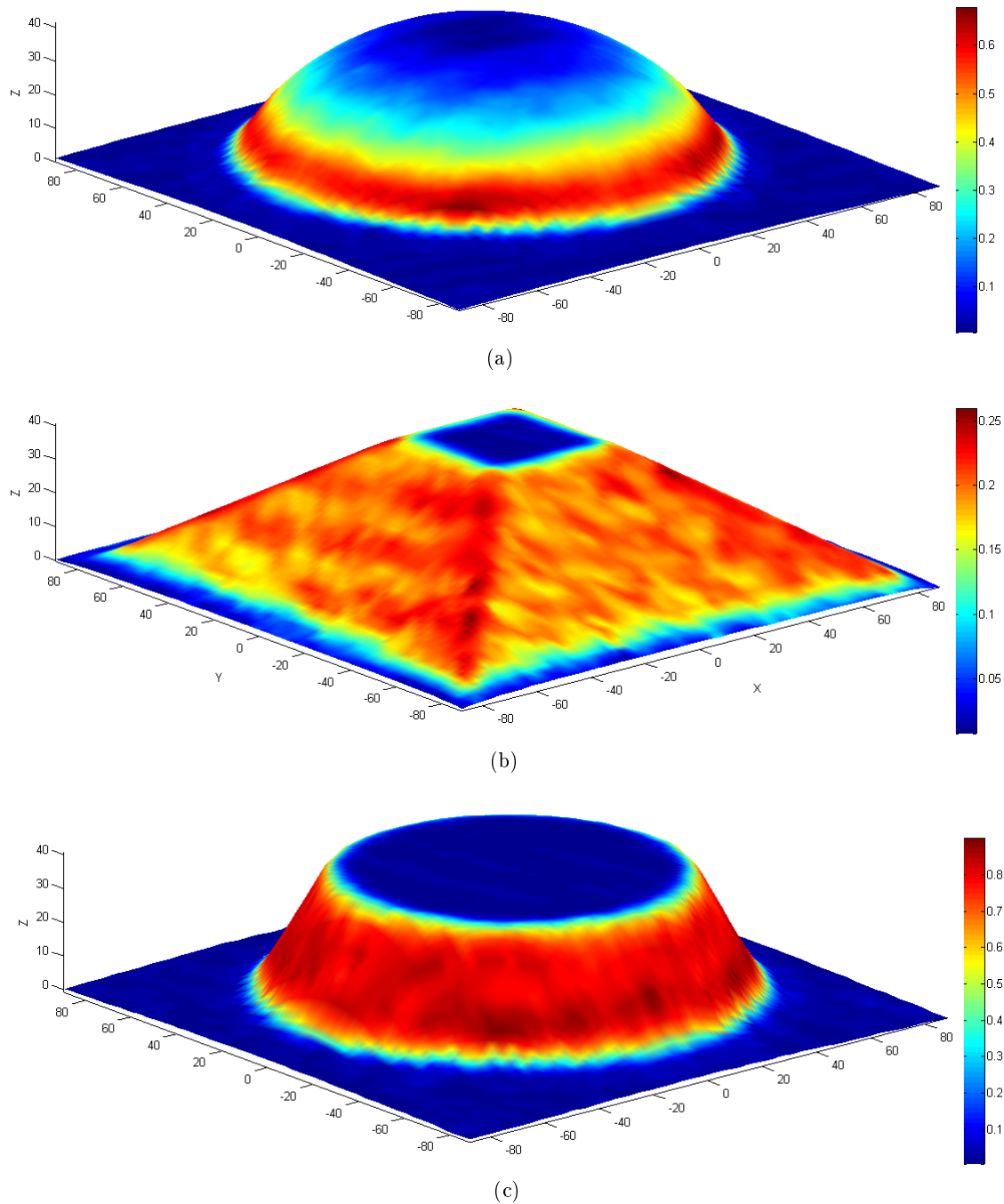


Figura A.8: Distribuição da deformação eficaz ao longo da superfície de um provete esférico (a), piramidal (b) e cónico (c).